B20396F

Max Planck FORSCHUNG

Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft 4.2009



FOKUS

Das Ich im Anderen

Die Entdeckung des sozialen Bewusstseins



Liebe Leserin, lieber Leser,

eine bemerkenswerte und gewiss nicht zufällige Laune der Geschichte hat es gewollt, dass die Wissenschaften den Makrokosmos der Außenwelt früher entdeckt und erschlossen haben als den Mikrokosmos der Innenwelt. In der Frühzeit standen Sonne, Mond und Sterne im Zentrum der Aufmerksamkeit. Dann kamen die Pflanzen und Tiere hinzu, die die Oberfläche unseres Planeten bevölkern. Und erst danach hat sich die wissenschaftliche Aufmerksamkeit auch auf die Menschen gerichtet und Disziplinen hervorgebracht, die ihr Denken und Tun mit ähnlichen Methoden untersuchen, wie sie sich im Bereich der unbelebten und belebten Natur als zweckmäßig erwiesen hatten.

Eine vergleichbare Abfolge der Aufmerksamkeit hat sich in der Geschichte der Max-Planck-Gesellschaft wiederholt. Während in ihrer Gründungsphase der Schwerpunkt ihrer Tätigkeit im Bereich von Chemie, Physik und Astronomie lag, war in der Nachkriegszeit ein verstärkter Ausbau der Lebenswissenschaften zu beobachten. Kognitionswissenschaftliche Forschung ist erst später hinzugekommen, und zwar mit Disziplinen wie Psychologie, Anthropologie, Ethologie, Linguistik und Neurowissenschaften. Darin steht menschliche Kognition im Vordergrund – bisweilen im Vergleich und in Abgrenzung zu kognitiven Leistungen anderer Säugetiere.

Kognitionswissenschaft ist eine Netzwerkdisziplin, die von der Vielfalt ihrer Einzeldisziplinen und der Wechselwirkung zwischen ihnen lebt. Den Einzeldisziplinen gemeinsam ist ihr Interesse an dem zentralen Gegenstand kognitionswissenschaftlicher Forschung: zu verstehen, was Menschen tun und denken, wovon ihr Tun und Denken abhängt und welche Prozesse und Mechanismen dahinterstecken. Was sie dagegen unterscheidet, sind die theoretischen und methodischen Ansätze, die sie verfolgen, und die Erklärungen, die sie als gültig ansehen.

Dabei ist es natürlich die Regel, dass die gleichen Phänomene in verschiedenen Disziplinen parallel untersucht werden. So etwa stehen elementare Prozesse sozialer Interaktion gleichzeitig im Brennpunkt anthropologischer, psychologischer, ethologischer und neurowissenschaftlicher Forschung. Im herkömmlichen Verständnis wird solche Interessenkonvergenz meist als Konkurrenz interpretiert – mit der Folge, dass die Disziplinen ebenso endlose wie fruchtlose Debatten über Wert und Unwert ihrer Forschungsansätze führen. Im Verständnis der gemeinsamen Netzwerkdisziplin wird Konvergenz dagegen für Kooperation genutzt – mit der Folge, dass die unproduktive Frage, wer die bessere Erklärung hat, durch die produktivere Frage ersetzt wird, wie sich die Erklärungen der Einzeldisziplinen aufeinander beziehen lassen.

Die bemerkenswerten Erfolge, die kognitionswissenschaftliche Forschung in letzter Zeit zu verzeichnen hatte, sind zum einen gewiss der Nutzung dieser multidisziplinären Synergien zu verdanken. Hinzu kommt eine erstaunliche theoretische Dynamik, die diese Forschung auszeichnet. So jung das Netzwerk dieser Disziplinen auch sein mag, es blickt bereits jetzt auf einen tiefgreifenden theoriegeschichtlichen Wandel zurück: den Übergang von individueller zu sozialer Kognition. In allen Disziplinen der Kognitionswissenschaften hat sich in den vergangenen Jahren die Einsicht durchgesetzt, dass kognitive Leistungen zwar von und durch Individuen erbracht, dass ihre Grundlagen aber im sozialen Austausch zwischen Individuen entstehen und geformt werden.

Das Fokusthema des vorliegenden Heftes reflektiert den *social turn*, den diese Einsicht in den Kognitionswissenschaften bewirkt hat. Arbeitsgruppen der Max-Planck-Gesellschaft haben diese Entwicklung maßgeblich mitgeprägt.



Wolfgang Prinz
Direktor am Max-Planck-Institut
für Kognitions- und Neurowissenschaften

Foto: Picture Point – S. Sonntag



Inhalt

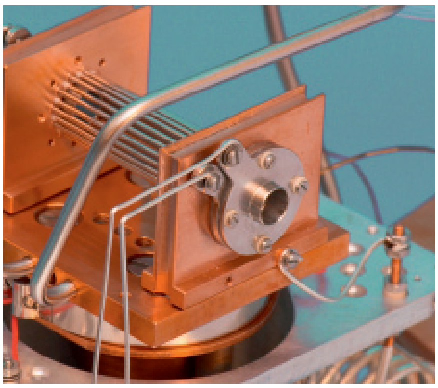


ZUM TITEL: Jeder beherrscht sie, die Kunst des Gedankenlesens. Denn über sie begreifen wir die Anderen als Individuen mit eigenen Wahrnehmungen, Gefühlen und Gedanken. Und nur so können wir uns vorstellen, was im Anderen vorgeht und Handlungen ganz genau miteinander abstimmen.

BIOMAX



Auf der Baustelle des Lebens – wie die Proteinfabriken der Zelle funktionieren



44 Um die Chemie des Alls im Labor zu simulieren, fangen Forscher H_3^+-Teilchen in dieser Falle.



68 Sylvie Roke hat Spaß daran, die Theorie weicher Materie wie etwa Emulsionen und Zellen umzukrempeln.



76 Wiesen reflektieren mehr Sonnenlicht als Wald. Daher verändern Rodungen schon lange lokales Klima.

SPEKTRUM

PHYSIK & ASTRONOMIE

BIOLOGIE & MEDIZIN

TECHNIK & MATERIAL

UMWELT & KLIMA

KULTUR & GESELLSCHAFT

RUBRIKEN

Von links nach rechts: Nick Enfield, SPL-Agentur Focus, Andreas Varnhorn, Frank Vinken, Corbis

Erster Weltgesundheitsgipfel in Berlin

Unter dem Titel „The Evolution of Medicine“ fand vom 14. bis 18. Oktober 2009 der erste Weltgesundheitsgipfel in Berlin statt. Initiator und Gastgeber der Konferenz war die Berliner Charité in Zusammenarbeit mit der Pariser Université Descartes; die Schirmherrschaft hatten die deutsche Bundeskanzlerin Angela Merkel und der französische Staatspräsident Nicolas Sarkozy übernommen. Rund 700 Experten aus Wissenschaft, Politik und Wirtschaft waren gekommen, um über die Lösung globaler Gesundheitsfragen zu diskutieren. „Gesundheit ist ein fundamentales Menschenrecht und ein bedeutender Wirtschaftsfaktor zugleich“, betonte Professor Axel Kahn von der Université Paris Descartes, einer der beiden Präsidenten des World Health Summit. „Dies bedeutet in Anbetracht einer alternden Gesellschaft, fortbestehender Ungleichheiten, nachlässigen Verhaltens und den daraus resultierenden Erkrankungen eine große Herausforderung. Das ist der Grund dafür, warum alle bestehenden Kräfte mobilisiert werden müssen.“ So forderte Mary Robinson, frühere irische Staatspräsidentin und Vorsitzende von GAVI, einer Nichtregierungsorganisation, die sich unter anderem für die Gesundheit von Müttern und Kindern in Entwicklungs- und Schwellenländern einsetzt, eine Stärkung der Gesundheitssysteme in diesen Ländern sowie neue technische Lösungen, um den Zugang zu medizinischer Versorgung für alle zu ermöglichen.

In der unter Leitung von Max-Planck-Präsident Peter Gruss stehenden Session zu personalisierter Medizin warb der ehemalige Direktor der National Institutes of Health (NIH), Elias Zerhouni, vor dem Hintergrund ständig steigender Gesundheitskosten für einen Paradigmenwechsel in der Medizin – vom Krankheitsmanagement zur Präzisionsmedizin, die Krankheiten schon im vorklinischen Stadium erkennt und verhindert. Nur eine präzise und personalisierte Medizin werde angesichts einer alternden Bevölkerung und zunehmender chronischer Erkrankungen Kosten reduzieren können, so Zerhouni. Die technologischen Grundlagen dafür werden von der sich rasant entwickelnden Genomforschung sowie anderer Bereiche der Biologie und der dazugehörigen Technologien gelegt. Für die größte globale Bedrohung des 21. Jahrhunderts halten die Experten den Klimawandel. Er sei schon heute für geschätzte 300 000 Todesfälle jährlich verantwortlich. Auf der im Dezember folgenden Kopenhagener Klimakonferenz war das Thema Gesundheit aber kaum präsent.

Eine von der Charité ins Leben gerufene Koalition von international herausragenden medizinischen Einrichtungen und Akademien der Wissenschaften, die sogenannte M8 Allianz, wurde während des Weltgesundheitsgipfels gegründet. Ihre Mitglieder „gewährleisten den Fortschritt und tragen die Verantwortung dafür, dass alle vorhandenen Möglichkeiten der akademischen Medizin tatsächlich ausgeschöpft werden, um Gesundheit für jeden zu erreichen.“ Ein Bewusstsein für die Dringlichkeit globaler Gesundheitsherausforderungen solle geschaffen und koordiniertes Handeln von Politikern, Zivilgesellschaft, Wirtschaft und der medizinischen Gemeinschaft verstärkt werden.

Max-Planck-Gesellschaft und Siemens laden zum Future Dialogue



In seinem Buch *Die Grenzen des Wachstums* hatte Dennis Meadows bereits vor rund 40 Jahren gewarnt, dass der Ressourcenverbrauch durch den Menschen den Planeten Erde überfordert. „Wir müssen unser Verhalten ändern“, mahnte Meadows daher auf dem „Future Dialogue“, zu dem die Max-Planck-Gesellschaft und Siemens über 400 Wissenschaftler, Politiker und Manager geladen hatten. Den Herausforderungen könnten Wissenschaft, Wirtschaft und Politik nur gemeinsam begegnen, betonte der Präsident der Max-Planck-Gesellschaft, Peter Gruss. Joschka Fischer, ehemaliger deutscher Außenminister, erklärte, dass die Politik den Rahmen für nachhaltigeres Wirtschaften schaffen müsse. Siemens setze bereits ganz auf grüne Technologien, so Siemens-Chef Peter Löscher.

Hochrangige Gäste auf dem Future Dialogue: Siemens-Chef Peter Löscher im Gespräch mit Peter Gruss und Joschka Fischer (von links).
Unter http://www.future-dialogue.org/de/highlights kann ein Filmmitschnitt des Vortrags von Dennis Meadows abgerufen werden.

Foto: Siemens

„Ein völlig unzureichender Zwischenschritt"

Michael Hüttner promoviert am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena und gehört dem Young Expert Team des Global Observatory an, in dem sich junge Wissenschaftler zusammengeschlossen haben, um die Klimaverhandlungen in Kopenhagen zu begleiten.

Herr Hüttner, sind Sie frustriert?
Michael Hüttner: Ja, das kann ich nicht anders sagen. Der Minimal-Kompromiss, den die Staaten hier erreicht haben, stellt aus wissenschaftlicher Sicht einen völlig unzureichenden Zwischenschritt bei der Umsetzung des Aktionsplans von Bali dar.

Was sieht dieser Aktionsplan vor?
Michael Hüttner: Bei der Klimakonferenz 2007 auf Bali hatten sich die Staaten geeinigt, in den kommenden zwei Jahren ein globales langfristiges Emissions-Reduktionsziel, ambitionierte mittelfristige Reduktionsziele für die Industrie- und Schwellenländer sowie eine effektive Kontrolle dieser Reduktionsverpflichtungen zu verhandeln. Gleichzeitig versprachen die Industriestaaten den Entwicklungsländern finanzielle Unterstützung für die Anpassung an den Klimawandel, Technologietransfer und die Reduktion von Emissionen aus Entwaldung und Walddegradierung. Nur in puncto Finanzzusagen wird das Ergebnis von Kopenhagen einigermaßen den Erwartungen gerecht. Darüber hinaus ist das Nennenswerte in den „Copenhagen Accords" das Ziel, die globale Durchschnittstemperatur auf unter zwei Grad Celsius Erwärmung begrenzen zu wollen.

Wie verbindlich ist die Festschreibung des Zwei-Grad-Ziels?
Michael Hüttner: Bei dem Abschlussdokument handelt es sich um kein offizielles Beschlusspapier der Vereinten Nationen, das einen Konsens aller Staaten erfordert. Statt dieses Dokument mit ihrer Unterschrift anzunehmen, bestätigen die Verhandlungsführer in einem Anhang nur, dass sie es zur Kenntnis nehmen. Nur mit dieser Konstruktion ist man überhaupt zu einem Ergebnis gekommen. Und am Ende wurden die am meisten betroffenen Entwicklungsländer auch noch erpresst. Hätten sie sich diesem Vorgehen verweigert, wären auch die Hilfszusagen nichtig gewesen.

Hätte man nicht mehr erwarten können angesichts von fast 120 Staats- und Regierungschefs, die in Kopenhagen um eine Einigung gerungen haben?
Michael Hüttner: Die Anwesenheit von so vielen Staats- und Regierungschefs und das enorme zivilgesellschaftliche Engagement haben ein unheimliches Momentum aufgebaut, das nicht genutzt wurde. Es wird sehr schwer, noch einmal solch eine Situation zu schaffen.

Hatten Sie den Eindruck, dass die Wissenschaftler in Kopenhagen nicht ausreichend gehört wurden?
Michael Hüttner: Die Vertreter der deutschen Delegation haben sich schon mit uns beraten. Ich hatte zum Beispiel Gelegenheit, mit den Delegierten über die klimarelevante Waldpolitik zu sprechen – mein Forschungsgebiet. Neben den offiziellen Verhandlungen gibt es auf den Klimakonferenzen immer auch Veranstaltungen am Rande, auf denen Forscher ihre neuesten Ergebnisse präsentieren. Normalerweise hören sich auch Politiker diese Vorträge an. Diesmal aber ist zum Beispiel der deutsche Entwicklungsminister Dirk Niebel nur gekommen, um seinen eigenen Vortrag zu halten, und gleich anschließend wieder gegangen. Das zeigt, wie groß der Verhandlungsdruck war.

In welchen Punkten haben sich die Verhandlungsführer zu wenig an den wissenschaftlichen Erkenntnissen orientiert?
Michael Hüttner: Vor allem bei den nötigen Reduktionszielen, um das Zwei-Grad-Ziel zu erreichen, und bei den Überprüfungsvorschriften, nach denen Staaten ihre Anstrengungen dokumentieren müssen.

Welche Reduktionsziele müssten sich die Staaten stecken, damit das Zwei-Grad-Ziel erreicht wird?
Michael Hüttner: Da gibt es keinen direkten Kausalzusammenhang. Wir können seitens der Wissenschaft nur Wahrscheinlichkeiten angeben. Wir haben eine rund 50- bis 70-prozentige Chance, das Zwei-Grad-Ziel zu erreichen, wenn die Industrieländer ihren Treibhausgas-Ausstoß bis 2020 um 25 bis 40 Prozent senken – verglichen mit 1990. Die Schwellenländer müssten ihre Emissionen bis 2020 um 15 bis 30 Prozent im Vergleich zur jetzigen Entwicklung senken.


Michael Hüttner

Die Unsicherheit, die Zwei-Grad-Grenze einzuhalten, ist also ziemlich hoch – selbst mit viel ehrgeizigeren als den jetzt beschlossenen Reduktionen?
Michael Hüttner: Richtig, daher denke ich, dass der klimawissenschaftlichen Debatte eine soziologische folgen müsste. Die Gesellschaft muss sich fragen: Wie viel Risiko wollen wir tragen? Wenn Sie an Medikamente denken: Wer würde schon ein 30- bis 50-prozentiges Risiko von schweren Nebenwirkungen akzeptieren?

Reicht es vor diesem Hintergrund, dass die weltweiten Treibhausgas-Emissionen zwischen 2015 und 2020 ihren Gipfel erreichen und dann sinken sollen?
Michael Hüttner: Aus wissenschaftlicher Sicht sollten wir eher 2015 diesen Scheitelpunkt erreichen. Gelingt das erst 2020, müssten wir jährlich acht Prozent einsparen – so viel, wie die EU im Kyoto-Protokoll in fünf Jahren versucht einzusparen. Das wäre nur unter sehr großen volkswirtschaftlichen Anstrengungen möglich.

Wie wird es jetzt also weitergehen?
Michael Hüttner: Die erste Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls endet 2012. Vermutlich wird es künftig neben dem Kyoto-Protokoll mit seinen strikten Regeln zu Reduktionen und Berichtspflichten ein zweites Protokoll mit weicheren Regeln geben. Das werden dann hoffentlich die Schwellenländer und die USA unterzeichnen. Es wird wahrscheinlich einen weiteren Minimal-Kompromiss enthalten. Ich hoffe allerdings, dass sich die USA noch bewegen werden, wenn die Wahlen zum Repräsentantenhaus im kommenden Jahr vorbei sind und der Senat über die 17-Prozent-Reduktion im Vergleich zu 2005 entschieden hat.

Foto: Privat

Startschuss für LOEWE-Zentrum in Marburg

Im Rahmen des LOEWE-Programms stellt die hessische Landesregierung bis 2013 insgesamt 410 Millionen Euro zur Förderung von Wissenschaft zur Verfügung. Das im November eingeweihte LOEWE-Zentrum in Marburg ist dem sehr jungen Forschungsgebiet der synthetischen Mikrobiologie gewidmet und bündelt die breit gefächerte Forschungserfahrung auf dem Gebiet der Mikrobiologie am Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie und an der Philipps-Universität Marburg. 21 Millionen Euro sollen in den kommenden drei Jahren an das LOEWE-Zentrum fließen. Es ist das zweite mit Max-Planck-Beteiligung – mit über 15 Millionen Euro fördert das Land Hessen bereits ein LOEWE-Zentrum zu Erkrankungen der Lunge und der Atemwege, an dem auch das Max-Planck-Institut für Herz- und Lungenforschung in Bad Nauheim beteiligt ist.



Volker Nienhaus, der Präsident der Philipps-Universität, Wissenschaftsministerin Eva Kühne-Hörmann, die Wissenschaftler Bruno Eckhardt und Lotte Søgaard-Andersen sowie Peter Gruss, Präsident der Max-Planck-Gesellschaft (von links)

Die Natur als Lehrmeister

Natürliche Materialien bestehen aus ganz wenigen Bausteinen und besitzen dennoch eine große Vielfalt an Mikrostrukturen. Die Natur benötigt nur eine geringe Anzahl an Zutaten, um Verbundmaterialien wie Perlmutt oder Zähne zu kreieren, die herausragende Materialeigenschaften besitzen wie etwa hohe Bruchfestigkeit. Bei künstlichen Materialien ist das genau umgekehrt: Es gibt meist nur eine begrenzte Zahl an hierarchischen Ebenen, aber eine ungeheure Fülle an potenziellen Werkstoffen, die sich kombinieren lassen. Ein neues Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) untersucht die Bauprinzipien und die Herstellung von hierarchisch strukturierten Materialien, die auf natürlichen Vorbildern basieren. In 13 verschiedenen Projekten, an denen mehr als zehn Universitäten sowie Max-Planck-Institute mitwirken, wollen die Forscher Hochleistungsmaterialien entwickeln, die von Insektenhaaren, Nussschalen oder Pflanzenkörpern inspiriert sind.

Es geht auch ohne Öl

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) hat einen neuen Sonderforschungsbereich/Transregio (SFB) mit acht Millionen Euro Fördermitteln bewilligt. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Dynamik komplexer technischer Systeme werden gemeinsam mit ihren Kollegen der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, der TU Berlin und der TU Dortmund an einem Projekt zu „Integrierten chemischen Prozessen in flüssigen Mehrphasensystemen“ forschen. Sie wollen neue Produktionsverfahren entwickeln, die in Zukunft wichtige Grundchemikalien aus Erdöl durch vergleichbare Stoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe ersetzen können. Die Förderung ist für eine Gesamtlaufzeit von zwölf Jahren vorgesehen.

Erfolgreiche Bilanz im Wettbewerb um EU-Forschungsgelder

Insgesamt acht „Advanced Grants“ konnten Institute der Max-Planck-Gesellschaft beim Europäischen Forschungsrat (ERC) 2009 einwerben. Damit rangiert die Max-Planck-Gesellschaft an Position vier unter den Top-Forschungseinrichtungen in Europa (jeweils zehn Grants gingen an den CNRS, die ETH Zürich und die Cambridge University). In Deutschland liegt sie an der Spitze, gefolgt von der Ludwig-Maximilians-Universität München mit drei sowie der Technischen Universität München und der Helmholtz-Gemeinschaft mit jeweils zwei erfolgreichen Anträgen. Die „Advanced Grants“ werden für etablierte Wissenschaftler ausgeschrieben. Bereits im September vergangenen Jahres wurden sechs „Starting Grants“ an junge Wissenschaftler aus der Max-Planck-Gesellschaft vergeben.

Foto: Philipps-Universität Marburg – Hellmuth Graßmann

Neuer Supercomputer am Deutschen Klimarechenzentrum



Einer der weltweit größten Supercomputer: „Blizzard“ lieferte wichtige Ergebnisse für die Weltklimakonferenz in Kopenhagen.

Foto: Deutsches Klimarechenzentrum – Michael Böttinger

Ein Großteil der wissenschaftlichen Grundlagen für die Weltklimakonferenz in Kopenhagen stammt aus den Berechnungen des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) in Hamburg. Jetzt erhält das DKRZ einen neuen, mit 35 Millionen Euro vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanzierten Höchstleistungsrechner. Der neue Klimarechner „Blizzard“ ermöglicht noch genauere Prognosen zukünftiger Klimaänderungen. Mit einer Spitzenrechengeschwindigkeit von 158 TeraFlop/s (Floating Point Operations pro Sekunde) ist er etwa 60-mal leistungsstärker als sein Vorgänger und einer der weltweit größten Supercomputer. „Blizzard“ wird sogar in der Lage sein, Wirbelstürme und sehr kleine Meereswirbel zu modellieren. Mit dem neuen Supercomputer können neben der Atmosphäre und den Ozeanen inzwischen auch Prozesse in Eis, Boden und Pflanzenreich sowie deren Einfluss auf die Kohlenstoffverteilung und damit der Treibhauseffekt einbezogen werden.

Ins Netz gegangen

Vielfältiges Leben bewahren
Nicht nur für Schüler, die eine Hausarbeit in Biologie schreiben, ist diese Webseite der Deutschen Gesellschaft für die Vereinten Nationen (UN) eine Fundgrube. Jeder, der sich für Artenvielfalt interessiert, kann sich hier durch Bildergalerien bedrohter Tiere und Pflanzen klicken oder Filme zum Thema ansehen. Zahlen, Fakten und anschauliches Kartenmaterial bringen den Nutzern die Historie der Biodiversitätskonvention und des Artenschutzes näher. Ein gelungener Auftritt zum „Internationalen Jahr der Biodiversität“ 2010:
http://www.dgvn.de/604.html

Der Tanz im Innern der Zelle
Ein erwachsener Mensch besteht aus 100 Billionen einzelner Zellen. In deren Innerem folgt alles einer fein abgestimmten Choreografie: DNA wird abgelesen und in Proteine übersetzt, die wiederum an die richtigen Orte der Zelle transportiert werden. Was meist dröge in jedem Lehrbuch erklärt ist, gerät zu Kunst, wenn biologische Animationen mit Musik hinterlegt und mittels neuester Computertechnik in Szene gesetzt werden. Das Multimedia-Projekt der Harvard University „BioVisions” lädt zum Lernen und Staunen ein:
http://multimedia.mcb.harvard.edu/

Alternsforschung online
Das neu gegründete Max-Planck-Institut für Biologie des Alterns ist mit einer schön gestalteten und informativen Webseite ins Netz gegangen, die regelmäßig ergänzt wird. Darauf finden sich aktuelle Nachrichten, Stellenausschreibungen sowie eine übersichtliche Darstellung der Forschungsschwerpunkte und -abteilungen. Ein klares Farbleitsystem ermöglicht eine leichte Navigation im Angebot. Ältere Menschen können sich darüber hinaus die Schrift vergrößern und so die Texte gut lesen.
http://www.age.mpg.de

Dem Vergessen trotzen
„Die neuere Gedächtnisgeschichte beginnt erst in dem Moment, wo man sich klarmacht, dass es nicht nur Individuen sind, die sich erinnern können, sondern auch Kollektive, Nationen, sogar Städte“, sagt Aleida Assman, Max-Planck-Forschungspreisträgerin 2009. Die Literaturwissenschaftlerin, die in diesem Film porträtiert wird, forscht in Konstanz. Seit den 1990er-Jahren liegt ihr Schwerpunkt auf den Themen kulturelles Gedächtnis, Erinnerung und Vergessen. Als eine Pionierin der Gedächtnisgeschichte gibt sie häufig gesellschaftliche Impulse zu den Debatten über den Holocaust oder die Schaffung einer europäischen Erinnerungskultur.
http://www.filme.mpg.de

Ausgezeichnete Wissenschaftsbilder

Wissenschaft, die Kunst ist, oder Kunst, die Wissenschaft abbildet: Max-Planck-Forscher gewinnen bei Fotowettbewerben regelmäßig Preise. Drei ihrer Aufnahmen wurden 2009 als „Bilder der Forschung" ausgezeichnet.



Oben: Zebrafische wachsen innerhalb von drei Monaten von einer befruchteten Eizelle zu einem geschlechtsreifen Tier heran. Bei diesen zwei Tage alten Larven ist die Mundöffnung bereits gut zu erkennen. Was wie Augen aussieht, sind mit Wimpern umrandete Einstülpungen: die zukünftigen Riechorgane. Wissenschaftler untersuchen an diesen Embryonen, wie sich Gewebe und Organe entwickeln. Bei der linken der hier gezeigten Larven führt ein genetischer Defekt zu Problemen bei der Entwicklung der Haut.
Foto: Jürgen Berger, Mahendra Sonawane

Unten: Der Tanz der Gottesanbeterin: Sobald die Räuberin in Gefahr gerät, nimmt sie eine Drohposition ein. Frontal präsentiert sie ihre prächtigen Farben, spreizt die Glieder und verwirrt ihre Feinde. Sie ist jederzeit bereit, dem Angreifer blitzschnell die hakenbewehrten Fangarme entgegenzuschleudern.
Foto: Igor Siwanowicz





Dieses kolorierte rasterelektronische Bild zeigt ein weißes Blutkörperchen (rot gefärbt), das gerade Tuberkulosebakterien (gelb gefärbt) vertilgt. Die Bakterien werden dabei von der Zellmembran der Fresszelle umschlossen, ins Innere gezogen und dort unschädlich gemacht.
Foto: Volker Brinkmann

Ideen für die Inventur der Vielfalt

Biodiversität bedeutet Nahrung, Rohstoffe, Medizin und ökologische Stabilität, aber auch kulturelle und ästhetische Erfahrung. Jedoch reduziert menschliches Handeln seit Jahrhunderten die biologische Vielfalt immer schneller. Die Vereinten Nationen haben das Jahr 2010 zum „Internationalen Jahr der Artenvielfalt" erklärt. Aber nach wie vor sind viele Fragen auf dem Gebiet der Biodiversitätsforschung offen – auch weil es an der Bündelung und Integration neuer Forschungsansätze mangelt.

TEXT **RUDOLF AMANN, ANTJE BOETIUS UND DIETHARD TAUTZ**

Nach mühevollen Expeditionen und jahrzehntelanger Arbeit gelang es Charles Darwin und einigen seiner Zeitgenossen durch Beobachtungen von Variation, Selektion und räumlicher Verteilung eine Theorie zur Evolution des Lebens zu entwickeln. 150 Jahre danach sind viele Biodiversitätsforscher noch immer Entdecker und Beschreiber. Sie hoffen aus den räumlichen und zeitlichen Mustern der ungeheuren Vielfalt des Lebens auf der Erde Regeln abzuleiten, welche die Prozesse der Anpassung und Evolution von Arten und Gemeinschaften erklären.

> Wir leben in einer Epoche des Massenaussterbens

Bisher war dies ein aufwendiger und oft wenig effizienter Prozess. Jetzt eröffnen Fortschritte bei der Sequenzierung von Erbinformation und in der Bioinformatik große Chancen für ein wesentlich besseres Verständnis von Biodiversität. Die Untersuchung der unermesslichen Vielfalt des Lebens schreitet in großen Schritten voran – und dafür ist es höchste Zeit: Denn im Rahmen der Convention on Biological Diversity (CBD) und als Strategie zum Umgang mit dem globalen Wandel hat sich Deutschland verpflichtet, bis zum Jahr 2010 dem Artensterben und dem Verlust von Lebensräumen mit gesellschaftspolitischen, kulturellen und ökonomischen Maßnahmen entgegenzutreten – unter anderem auch mit der Förderung der Biodiversitätsforschung.

Eine einfache, aber noch immer nicht beantwortete Frage ist die nach dem „Wieviel": Die Schätzungen über die Anzahl der Arten, die gegenwärtig unseren Planeten bevölkern, schwanken zwischen zehn Millionen und zehn Milliarden. Wie viele verschiedene Arten von Tieren, Pflanzen, Pilzen, einzelligen Protozoen oder Bakterien gibt es auf der Erde? Diese Fragen tauchen in der öffentlichen Diskussion vor allem im Zusammenhang mit dem Befund auf, dass wir uns in einer Epoche des Massenaussterbens von Arten befinden.

Die Beschäftigung mit der Vielfalt des Lebens entspringt aber auch der natürlichen Neugier des Menschen auf die Beschaffenheit seiner Umwelt – getreu dem Kinderlied *Weißt Du, wie viel Sternlein stehen*. In der Astronomie ist die systematische Erfassung der Sterne in der Tat eine entscheidende Komponente des

Foto: SPL-Agentur Focus



Die Vielfalt der Arten auf unserem Planeten ist lebenswichtig, ihre Erforschung braucht neue Impulse.

Forschungsansatzes. In der Biologie ist die Erfassung der Diversität zwar auch seit Jahrhunderten ein zentrales Thema. Aber gerade heute, wo wir den Wert der Biodiversität zu verstehen suchen, rückt sie eher in den Hintergrund.

Gegenwärtig ist die Biologie sehr funktional ausgerichtet. Sammeln und Beschreiben wird als hypothesenfrei abgetan. Damit läuft die Biologie aber Gefahr, sich selbst einer ihrer Grundlagen zu berauben.

Die systematische Erfassung von Biodiversität muss zu einem Ziel der Grundlagenforschung werden

Die systematische Erfassung von Biodiversität muss wieder zu einem akzeptierten Ziel der biologischen Grundlagenforschung werden.

Dazu müssen aber auch neue Konzepte entwickelt werden, um der Herausforderung der schieren Menge an Arten gerecht zu werden. Zurzeit werden jedes Jahr etwa 20 000 Arten wissenschaftlich beschrieben – wobei den größten Anteil die Tiere ausmachen. Selbst bei der konservativsten Schätzung von zehn Millionen Arten würde es bei der gegenwärtigen Geschwindigkeit weitere 400 Jahre dauern, eine vollständige Inventur allein der Tiere und Pflanzen auf der Erde zu erhalten. Wir müssen den Prozess, Arten wissenschaftlich zu identifizieren, zu beschreiben und auch zu benennen um mindestens eine Größenordnung beschleunigen. Nur so erhalten wir in einem angemessenen Zeitraum eine Enzyklopädie des Lebens.

Eine systematische Methode der Biodiversitätsforschung ist der „Zensus" – mit dem zentralen Ziel, auf allen taxonomischen und organisatorischen Stufen Biodiversität quantitativ zu erfassen und so für die Forschung, aber auch für Erhaltungskonzepte von Lebensräumen fundierte Grundlagen zu schaffen. Der Übergang zu einer quantitativen Beschreibung bedeutet in der Grundlagenforschung stets einen großen Erkenntnisgewinn. Das wird beim Thema Biodiversität nicht anders sein. Durch die systematische Erforschung der Lebensvielfalt werden wir die Muster erkennen, die auf eine Anpassung der Organismen und ihrer Gemeinschaften an die sich ändernde Umwelt schließen lassen, aber auch Konsequenzen für Stoffflüsse und Nahrungsnetze haben können.

Neben der Frage nach dem „Wieviel" stellen sich die Fragen nach dem „Wo" und dem „Wann", also der räumlichen und zeitlichen Dynamik in der Anzahl und der relativen Häufigkeit von Lebewesen in ihrem Lebensraum, ihrer Beziehung zueinander und zur unbelebten Umwelt. Dabei wird sich der Blick zunehmend von Einzelorganismen hin zu Lebensgemeinschaften weiten, vom Verständnis der biologischen Nische hin zu den Dimensionen der Lebensräume und den Verbreitungswegen. Von dem modernen Biodiversitätsforscher wird deshalb erwartet, nicht nur molekulare Daten miteinander zu vergleichen, sondern sie auch mit Daten aus Erdbeobachtungen zu verknüpfen, um daraus Trends und Regeln abzuleiten.

In der Zusammenarbeit mit anderen Zweigen der Erd- und Lebenswissenschaften sollte es möglich sein, auch die schwierigste Frage, nach dem „Warum", zu beantworten. Was bedeutet es ökologisch, wenn eine taxonomische Gruppe eine enorm hohe Vielfalt zeigt? Wie sehr ist Biodiversität für die Funktion und Produktivität von Ökosystemen wichtig? Sind auch seltene Arten bedeutend für die Lebensgemeinschaft? Wie viel ist uns Artenvielfalt wert? Und was passiert mit der Lebensgemeinschaft, wenn nur ein einziges Mitglied verschwindet? Kann das zur Instabilität des Systems führen, analog dem Schmetterlingseffekt in der Chaostheorie?

Es besteht in der Öffentlichkeit und in der Politik bereits Einigkeit über die große Bedeutung der Biodiversität und der ihr zugrunde liegenden genetischen Ressourcen für das menschliche Leben. Biodiversität bedeutet Nahrung, Rohstoffe, Medizin und ökologische Stabilität, aber auch kulturelle und ästhetische Erfahrung. Jedoch reduziert menschliches Handeln die biologische Vielfalt seit Jahrhunderten immer schneller. So gehen die inhärenten Werte biologischer Organismen unwiderruflich verloren.



Für die rasch wachsende Weltbevölkerung werden immer neue Flächen landwirtschaftlich nutzbar gemacht, wozu mehr und mehr auch die Flächennutzung für Energiepflanzen beiträgt. Es wird nach Lösungen für die negativen Wirkungen des Klimawandels gesucht. Wenn wir aber für den Klimaschutz natürliche Vegetation in Plantagen zur Kohlendioxid-Fixierung umwandeln, wird so die nächste Welle der Artauslöschung nicht nur legitimiert, sondern geradezu staatlich gefördert.

Die aktuelle Diskussion um den Klimawandel zeigt, dass sich die Umwelt regional erheblich schneller ändern kann als gedacht. Manche Ereignisse wie die Schmelze von Gletscher- und Meereis, die zunehmenden Überflutungen von Flussdelta-Regionen oder die Ausbreitung neuer Krankheiten laufen auf zeitlichen Skalen ab, wie sie in Laborexperimenten zugänglich sind, um das Leben und seine Anpassungsfähigkeiten zu untersuchen. Dennoch gibt es erstaunlich wenig biologische Klimafolgen-Forschung, die sich dieser Phänomene annimmt. Vor diesem Hintergrund werden die bisher spärlichen ökologischen Langzeitbeobachtungen an Land und im Meer für die Wissenschaft immer wertvoller.

Auch um die theoretische, konzeptionelle und infrastrukturelle Basis dieser Disziplin ist es nicht gut bestellt. Die Gründe dafür sind historisch und kulturell bedingt und liegen etwa in der Trennung taxonomischer Forschung von anderen Lebens- und Umweltwissenschaften oder am Mangel der Integration molekularer und klassischer Methoden der Biologie in universitären Abteilungen und Museen.

Wir glauben, dass sich der multidisziplinäre Wissenschaftszweig „Biodiversitätsforschung“ als Teil der Umweltforschung und Erdbeobachtung in einem Umbruch befindet – so wie auch die medizinische Forschung seit dem Zeitalter der Hochdurchsatz-Sequenzierung völlig neue Wege der Untersuchung des Menschen und der Vielfalt seiner Symbionten, Parasiten und Krankheitserreger beschritten hat. Die neuen technischen Möglichkeiten zur Biodiversitätserfassung reichen weit über eine reine Fortschreibung traditioneller Taxonomie hinaus: Es geht darum, eine alte Disziplin neu zu erfinden, ohne ihre Wurzeln zu vergessen.

Eines der dringendsten Probleme, das von jeher alle Teile der Biodiversitätsforschung betrifft, ist die Charakterisierung und Zählung der Arten. Derzeit existieren viele und für jede Organismengruppe spezialisierte Artkonzepte. Das biologische Artkonzept von Ernst Mayr, wonach eine Art als „Gruppe von sich untereinander fortpflanzenden Lebewesen definiert ist, die reproduktiv von anderen solchen Gruppen isoliert sind“, lässt sich nur auf die höheren Tiere und Blütenpflanzen einigermaßen anwenden, kaum jedoch auf die Pilze, Protozoen und die beiden Reiche der Prokaryonten, die Bacteria und Archaea.

Es geht darum, eine alte Disziplin neu zu erfinden, ohne ihre Wurzeln zu vergessen

Einzellige Organismen wie auch die meisten der hochdiversen kleinen wirbellosen Tiere, die in Böden, Sedimenten und aquatischen Lebensräumen sowie als Parasiten oder Symbionten an Pflanzen und Tieren existieren, bergen viele kryptische Arten, die sich phänotypisch nicht unterscheiden lassen, oft aber völlig verschiedene Funktionen in der Umwelt haben. In den vergangenen Jahren setzt sich daher zunehmend das *General Lineage* genannte Artkonzept durch, wonach Arten als eigenständige evolutive Stammlinien aufgefasst werden. Die Identifizierung solcher Stammlinien erfordert dabei die Integration unterschiedlicher Merkmalssätze anstatt der alleinigen Anwendung klassischer morphologischer Verfahren.

DNA-basierte Techniken versprechen einen Ausweg aus diesem Dilemma, haben sie sich in den vergangenen Jahren doch rapide entwickelt. Hochdurchsatz-Technologien (wie etwa *Next Generation Sequencing*, NGS) ermöglichen es jetzt, die Biodiversität jenseits der engen Grenzen von biologischen Fachgruppen mit ihren speziellen Artkonzepten



quantitativ zu erfassen. Die vergleichende Sequenzanalyse wird außerdem eine genauere Analyse der Artbildung erlauben und kann auf Basis populationsgenetischer Modelle zu einer dringend gebotenen Vergleichbarkeit der Artkonzepte beitragen.

Bei Kleinstlebewesen wie den Bacteria und Archaea, die mit mehreren tausend taxonomischen Einheiten pro Liter Wasser oder Sediment auftreten

Das Metagenom liefert viele neue Erkenntnisse über Kleinstlebewesen

und von denen wir erst wenige Prozent kennen, erlauben nur die Hochdurchsatzmethoden der Molekularbiologie eine Erforschung auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen. Im Zusammenhang mit hoch aufgelösten Messungen weiterer Umweltparameter ermöglicht es die vergleichende Sequenzanalyse auch, Regeln der Assoziation von Organismen untereinander und mit speziellen Nischen oder Habitaten zu untersuchen sowie durch Umweltfaktoren gesteuerte Änderungen in der Vielfalt zu quantifizieren. Ein wichtiges Ergebnis solcher Forschungen kann es sein, die klassische Systematik, mit der einst Carl von Linné Ordnung in die belebte Natur brachte, neu zu überdenken.

Bei ersten Versuchen, alle in einem Habitat vorkommenden Genome – das sogenannte Metagenom – zu sequenzieren, hat man bereits viele neue Erkenntnisse über die dominanten Kleinstlebewesen erhalten. In vielen Lebensräumen scheinen einige wenige Arten von Bakterien oder Archaea-Bakterien einen bedeutenden Anteil der Biomasse der Gemeinschaft zu dominieren. Was macht diese Arten so erfolgreich? Oder handelt es sich vielleicht doch um heterogene Ansammlungen vieler verschieden angepasster ökologischer Typen?

Die Rolle von genetischer und epigenetischer Anpassung in einer sich verändernden Umwelt ist von besonderer Bedeutung für schnelle Reaktionen, wie wir sie im Rahmen des Klimawandels erwarten. Wir verstehen bisher viel zu wenig von den Mechanismen, die es einer Art ermöglichen, sich an veränderte Bedingungen und neue Lebensräume anzupassen. In einer Kombination von Methoden aus quantitativer Genetik und der Genomanalyse von Mikroorganismen ergeben sich derzeit neue Ansätze, die funktionalen Grundlagen zu entschlüsseln.

Die Kenntnis der Biodiversität ist bei der hohen Anzahl und Vielfalt von Mikroorganismen auch in den extremsten Lebensräumen eine wichtige Grundlage und eventuell sogar ein wichtiger funktioneller Parameter von Ökosystemen. Die ersten Datensätze zur phylogenetischen Vielfalt von Mikroorganismen in der Umwelt zeigen, dass die beobachteten Muster weder zufälliger Natur sind, noch dass sie sich einfach durch die Selektion von Populationen – etwa durch Energieverfügbarkeit oder andere Umweltbedingungen – erklären lassen. Vielmehr weisen sie auf eine starke Rolle biologischer Interaktionen sowie räumlich begrenzter Verbreitungswege, genetischer Evolution und anderer historischer Bedingungen hin. Dabei ist es noch völlig unklar, ob die Theorien der Diversität von Pflanzen und Tieren ebenso für Mikroorganismen gelten.

Die Bedeutung artspezifischer Mikrobiome und ihre Rolle in der Biologie von Lebewesen werden zunehmend klarer. Beim Menschen wird derzeit das „Humanmikrobiom" untersucht, um alle mit dem Menschen verbundenen Mikroorganismen kennenzulernen und Rückschlüsse auf Krankheiten zu ziehen. Es gilt aber auch bei jedem anderen Lebewesen, spezifische Assoziationen mit Kleinstlebewesen zu entdecken. Hierzu gehört das Darmmikrobiom von Tieren ebenso wie die Wechselwirkung von Pflanzen mit den Organismen der Rhizo- und Phyllosphäre (Wurzeln und Blätter) und der faszinierenden Welt der Pilze.

Wie sich verschiedene Arten zusammen entwickeln und aneinander anpassen, sodass gerichtete Veränderungen im Geno- und Phänotyp auftreten – bis hin zu einem gemeinsamen Lebenszyklus –, bleibt eine der spannendsten Fragen der Biologie. Hier liegt möglicherweise der Schlüssel zum Verständnis der Evolution des Immunsystems. Ebenso erhoffen wir Antworten auf Fragen nach der Entstehung des Lebens und seiner Anpassungsfähigkeit an die Umwelt.

Die Rolle und Rückwirkung der Biodiversität auf geochemische und klimatologische Rahmenbedingungen sowie die Nahrungsnetze und organischen Stoffflüsse durch das Ökosystem stehen weit oben auf der Skala der Themen des globalen Wandels. Wir wissen derzeit sehr wenig darüber, wie das Netzwerk interagierender Organismen die Veränderungen einzelner Umweltparameter, etwa die CO_2-Konzentration oder die Temperatur, aufnimmt und puffert. Auf der Basis einer soliden Kenntnis dieser wichtigsten Komponenten der Biodiversität in bestimmten Lebensräumen wird es möglich sein, sich mit Modellen und Experimenten diesen Fragen zu nähern.

Die vergleichende Untersuchung von Ökosystemfunktionen in der Rückkopplung mit Biodiversität und Umwelt kann von der Frühgeschichte der Erde bis zu biologischen Modellen reichen und hat ihren Schwerpunkt in der Verknüpfung und Synthese von Felddaten und experimentellen Ergebnissen mit Ökosystemmodellen.

Eine solche Biodiversitätsforschung kann dazu beitragen, genauere Antworten zu geben auf die Urfragen nach dem „Woher“ (Evolution) und dem „Wohin“ (Zukunft des Lebens auf der Erde) und damit die ökologische Beziehung des Menschen zu seiner Umwelt in den Mittelpunkt stellen. Dazu benötigt die Biologie aber auf Dauer Strukturen, wie wir sie heute von großen internationalen Experimenten der Physik oder Astronomie kennen. Die Erforschung der Evolution, Funktion und Ökologie der Lebensvielfalt auf der Erde sind für die Menschheit so grundlegend, dass wir vor dieser neuen Größenordnung nicht zurückschrecken sollten. ◂

> Die Biologie benötigt Strukturen wie bei großen Experimenten der Physik oder Astronomie

DIE AUTOREN



Rudolf Amann, Jahrgang 1961, leitete am Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie in Bremen die Selbstständige Nachwuchsgruppe „Molekulare Ökologie“. Seit 2001 ist er Direktor und Wissenschaftliches Mitglied am Institut sowie Professor der Universität Bremen.



Antje Boetius, Jahrgang 1967, wurde 2003 Leiterin der Forschungsgruppe „Mikrobielle Habitate“ am Bremer Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie. Seit März 2009 ist sie Professorin für Geomikrobiologie an der Universität Bremen, im selben Jahr erhielt sie den Leibniz-Preis.



Diethard Tautz, Jahrgang 1957, war Gruppenleiter am Institut für Genetik der Universität München, dann Professor am Zoologischen Institut derselben Hochschule und schließlich Professor am Institut für Genetik der Universität Köln. Seit 2007 ist er Direktor am Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie.

Der Hund denkt mit

„Ich sehe was, was du nicht siehst" – für Kognitionsforscher ist dieser Zeitvertreib alles andere als ein Kinderspiel. Denn er setzt voraus, dass sich derjenige, der an der Reihe ist, vorstellen kann, was die anderen sehen können und was nicht. Aber gilt das auch für Tiere wie Affen oder gar Hunde? Am **Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie** in Leipzig erforschen Wissenschaftler die sozialen Erkenntnismöglichkeiten verschiedener Tierarten.

TEXT **BIRGIT FENZEL**

Die Kunst des Gedankenlesens hat einen wissenschaftlichen Namen: *Theory of Mind*. Über sie begreifen Menschen andere Menschen als Individuen mit eigenen Wahrnehmungen, Gefühlen und Gedanken und können sich danach vorstellen, was im anderen vorgeht. Für Forscher gehört die *Theory of Mind* zu den Grundlagen des Lernens und Lehrens und somit auch zur Entstehung von Kultur – man denke nur an die Rolle, die Nachahmung und Imitation, Zeigen und Vorführen für die Weitergabe von Wissen oder beim Spracherwerb spielen.

Lange Zeit ging man davon aus, dass die *Theory of Mind* eine originär menschliche Fähigkeit sei, die sich im Verlauf der Evolution entwickelt hat. Doch konnten Wissenschaftler um Michael Tomasello in der Abteilung für vergleichende und Entwicklungspsychologie am Leipziger Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie beobachten, dass auch Schimpansen einige Schlüsselaspekte dieser Fähigkeit, Perspektiven und Absichten anderer wahrzunehmen, vorweisen.

Um herauszufinden, was Affen über die Wahrnehmungen ihrer Gruppengenossen wissen, hatte der Psychologe Josep Call den ausgeprägten Futterneid der Bewohner des Affenhauses im Pongoland ausgenutzt und Obststückchen im Gehege verstecken lassen. Tatsächlich trauten sich die niedrigeren Ränge nur an die Extraportion, wenn sie zuvor gesehen hatten, dass das Alphamännchen weder das Verstecken mitbekommen noch das Futter im Blickfeld hatte.

FINGERZEIGE FÜR DIE EVOLUTIONSBIOLOGEN

Damit relativierte sich die bisherige Behauptung, die *Theory of Mind* sei eine einzigartig menschliche Fähigkeit. Aber wie weit reicht das Verständnis der Menschenaffen über den Wissenszustand anderer? Können sie möglicherweise auch in kommunikativen Kontexten Zeigegesten oder andere referentielle Hinweise nutzen? „Für uns sind solche Fragen enorm spannend", sagt die Biologin Juliane Bräuer, die in Tomasellos Abteilung die sozialen Erkenntnismöglichkeiten verschiedener Tierarten erforscht. „Der Vergleich zwischen den verschiedenen Arten gibt uns Aufschlüsse über uns selbst, darüber, was sich im Lauf unserer Entwicklung verändert hat – denn letztlich ist ja eine unserer großen Fragen, wie sich die menschliche Kognition im Lauf der Evolution entwickelt hat."

So ist die Fähigkeit, sich in die Wahrnehmungs- und Handlungsperspektive eines anderen hineinzuversetzen, Menschen in die Wiege gelegt und spielt eine wesentliche Rolle beim frühkindlichen Spracherwerb. Durch das Zeigen auf ein Objekt lernt das Kind von Mutter oder Vater die entsprechende Bezeichnung. Auch geht man inzwischen davon aus, dass Gesten an der Wurzel der Sprache überhaupt liegen: Die Laute und Worte kamen erst nach dem Fingerzeigen.

Doch wie Call und Kollegen bei ihren Studien im Primatenzentrum des Leipziger Zoos zu ihrer Verblüffung feststellten, würden Menschenaffen nicht mal einem Wink mit dem Zaunpfahl folgen: Fingerzeige, das hat eine Reihe von Versuchen mit versteckten Obststückchen gezeigt, funktionieren in der Mensch-Affe-Kommunikation nicht – die Affen verstehen offenbar nicht, was ihnen ihr menschlicher Versuchspartner mit der Geste auf einen bestimmten Behälter mitteilen will. Nach diesen Experimenten schien es so, als sei das Deuten kommunikativer Hinweise eine rein menschliche Gabe. Denn wenn schon die ontogenetisch nächste Verwandtschaft des Menschen keine Zeigegesten verstehen kann, wer dann? Die Antwort kam von unverhoff-

Foto: Getty Images



Übung macht den Meister – auch beim Hundeblick. Forschern zufolge ist er nicht die einzige Fähigkeit, mit der sich Hunde in 15 000 Jahren auf den Menschen spezialisiert haben.

» Jahrtausendelange Domestikation verwandelte Hunde in Kommunikationsprofis mit vielen Talenten.



Menschenaffen wie dieser Orang-Utan kommen bei Zeigegesten höchstens schwer ins Grübeln.

ter Seite: „Mein Hund kann das aber", behauptete der damalige Doktorand Brian Hare (MaxPlanckForschung 1/2006, Seite 74 ff.).

Mit dieser eher beiläufig dahingeworfenen Bemerkung handelte sich Hare gleich den Auftrag zu einer eigenen Studie ein. Tatsächlich stellte sich bald heraus, dass sein Hund offenbar nicht das einzige Kommunikationsgenie unter den Caniden war, das menschliche Fingerzeige zu deuten weiß. Wie zuvor im Affenhaus kam dabei der „Object-Choice-Test" zum Einsatz. Dabei wurden die Hunde mit zwei identischen umgedrehten Bechern konfrontiert, wobei nur unter einem davon ein Leckerli lag. Unter welchem, konnte der Hund nicht wissen, weil er das Verstecken nicht gesehen hatte.

Dann zeigte sein menschlicher Testpartner auf den Becher mit dem interessanten Inhalt. Danach durfte der Hund wählen – die Tiere taten dies, indem sie mit der Schnauze oder Pfote den Becher ihrer Wahl berührten. War's der Richtige, gab es die Belohnung, beim falschen Becher ging der Hund leer aus. Um sicherzugehen, dass sich die Hunde nicht von ihrer feinen Nase leiten ließen, gab es in einem Kontrollversuch überhaupt keine referentiellen Hinweise auf den richtigen Becher. „Wählte das Tier dabei mal richtig und mal falsch, war klar, dass es das Futter nicht riechen konnte", erklärt Juliane Bräuer die Probe aufs Exempel.

Schon bei diesem Test zeigte sich, dass Brian Hare mit seiner Behauptung nicht zu viel versprochen hatte: Die Hunde entschieden sich bevorzugt für den Becher, auf den zuvor der Mensch gezeigt hatte – die stille Botschaft war offenbar angekommen. „Im Jahr 1998 erschien dann Hares Veröffentlichung über Hundekognition", erzählt die 33-jährige Biologin Bräuer. Sie selbst ist seit 1999 am Max-Planck-Institut und schrieb dort 2002 ihre Diplomarbeit. Zur selben Zeit widmete sich damals in Budapest ebenfalls eine Gruppe von Forschern der Frage, welche menschlichen Hinweise Hunde nutzen können.

VOM MÄNGELEXEMPLAR ZUM KLASSENPRIMUS

Die Wissenschaftsgemeinde nahm die Studien in Leipzig und Budapest zunächst eher zurückhaltend auf. „Für Hunde interessierte sich einfach kaum jemand. Man hielt sie für ungeeignet, weil sie in einer unnatürlichen Umgebung leben, und die Ergebnisse solcher Versuche deshalb nicht ihre wahre Natur widerspiegeln würden", so erklärt Bräuer, weshalb Hunde in den blinden Fleck der Forschung gerückt waren.

Zudem sei der Hund lange Zeit als „unvollständiger" Wolf abgewertet worden, da er viele Fähigkeiten seiner in Freiheit lebenden Vorfahren nicht mehr besitzt. So sind etwa sein Geruchs- und Hörvermögen deutlich schlechter als die seiner sich selbst versorgenden wilden Verwandtschaft. Doch schon bei den ersten Verhaltensstudien in Leipzig überraschte der vermeintlich durch Domestizierung Degenerierte mit seinen kognitiven und sozialen Fähigkeiten und erwies sich bei vielen vergleichenden Studien als neuer Primus gegenüber den Primaten im Pongoland.

Doch woher kann ein Hund das? Hat er durch das nahe Zusammenleben mit dem Menschen die Zeichen als „Fremdsprache" schon im Welpenalter erlernt? Oder ist dieses Vermögen etwa angeboren? Um das herauszufinden, führten die Doktorandin Julia Riedel und Kollegen den Objektwahltest mit jungen Hunden im Alter von sechs bis 16 Wochen durch. Um auszuschließen, dass die Welpen einfach bei dem Becher ihr Glück versuchten, der der Hand des Zeichengebers am nächsten stand – Hände sind für Hunde erfahrungsgemäß immer hochinteressant –, wurde als zusätzliche Bedingung für diesen Test eingeführt, dass sich die Welpen von der Hand wegbewegen mussten, um zu den Bechern zu kommen.

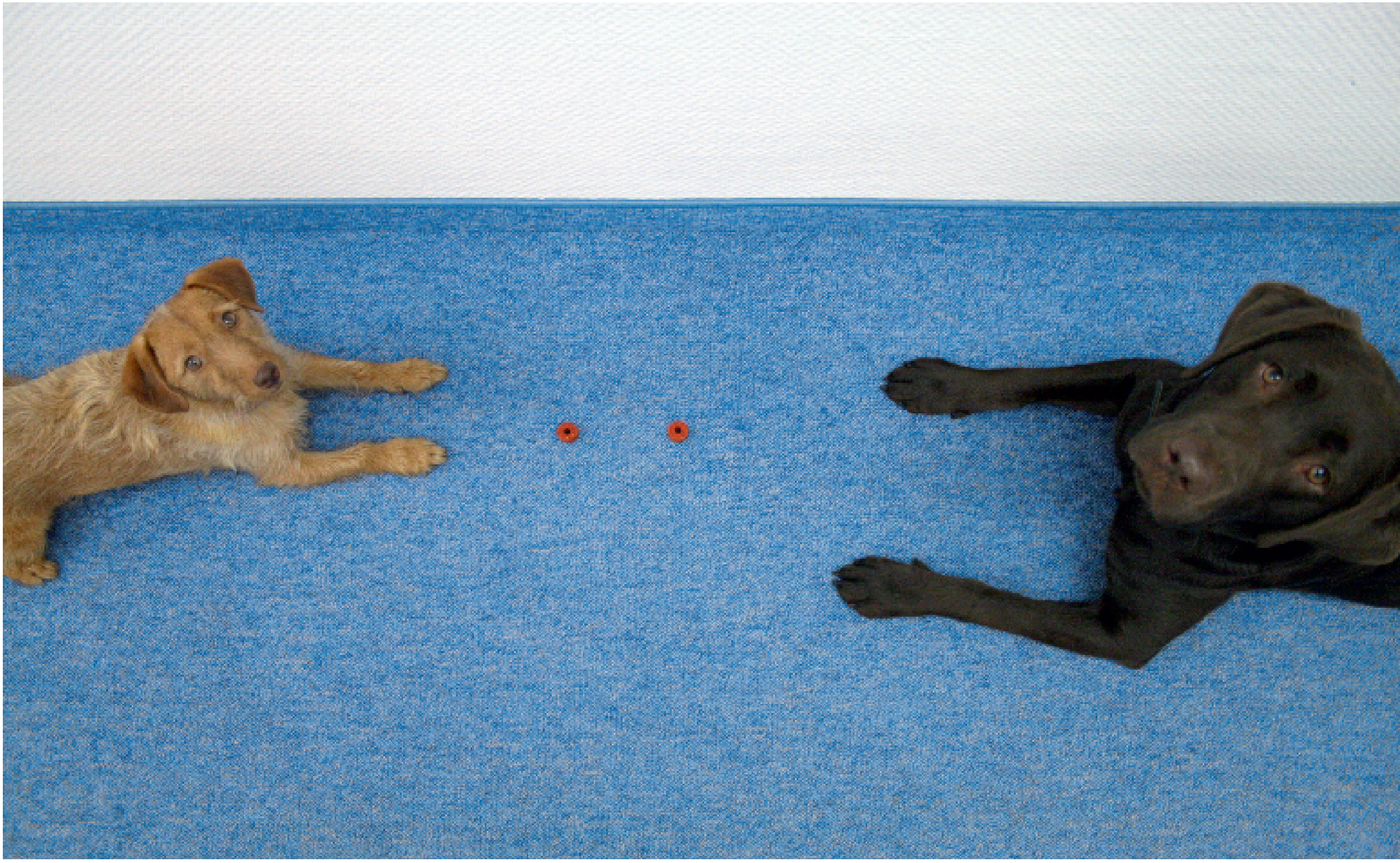
„Welpen aller Altersstufen nutzten die Zeigegeste als Hinweis auf das Futterversteck gleich gut und wählten den richtigen Becher aus", fasst Riedel das Resultat zusammen. Dieses Ergebnis sei ein Hinweis darauf, dass die Fähigkeit, kommunikativen Gesten des Menschen zu folgen, von Hunden nicht erlernt werden müsse, sondern angeboren sei. „Das wiederum lässt den Schluss zu, dass bei ihrer Entstehung die jahrtausendelange Domestikation eine entscheidende Rolle gespielt hat." Dafür spreche auch die Erfahrung aus Studi-





Fotos: MPI für evolutionäre Anthropologie (2)

Zwei Becher, ein Keks, keine Geruchsspur. Auch ohne ihre Nase einzusetzen, fanden Hunde aller Rassen sofort heraus, wo die Belohnung versteckt war. Anders als die Menschenaffen verstehen sie Fingerzeige sofort.



Das Kommando „Aus“ gilt so lange, wie ein Mensch zuschaut. In der Studie waren die Hunde immer brav, wenn menschliche Blicke auf ihnen ruhten, und klauten die Kekskringel fast immer, wenn sie sich unbeobachtet fühlten.

en mit von Hand aufgezogenen Wölfen, die – obschon ebenfalls an den Menschen und seine Ausdrucksformen gewöhnt – keine Fingerzeige verstehen.

Wie gut Hunde tatsächlich wissen, was andere sehen können und was nicht, zeigte sich in einer weiteren Studie, die Bräuer gemeinsam mit ihrer Kollegin Juliane Kaminski ausklügelte. Die Idee dazu hatte dabei Bräuers Hündin Mora geliefert. Mora hatte bei einem Spaziergang ein altes Wurstbrot entdeckt, das jemand achtlos weggeworfen hatte, und dieses als willkommene Ergänzung des Speiseplans betrachtet. Auf das Kommando „Aus“ ließ sie zwar brav die Beute fallen, wofür sie auch gelobt wurde. Doch kaum hatte sich Bräuer umgedreht, schnappte sich Mora sofort wieder das Brot und verschlang es schnell hinter dem Rücken ihrer Besitzerin.

„Die interessantesten Versuche sind immer die, die einen direkten Bezug zur Lebensweise des getesteten Tieres haben“, meint die Max-Planck-Forscherin. Was sie mit ihrer Hündin im Park erlebte, ist eine Bilderbuchszene aus dem ganz gewöhnlichen Hundealltag, wie wohl die meisten Hundehalter bestätigen können: Hund darf nicht aufs Sofa oder Bett und sitzt sofort darauf, sobald er sich unbeobachtet fühlt; Hund soll im Korb bleiben und ist sofort draußen, sobald sein Mensch den Raum verlassen hat; Hund darf nichts vom Tisch klauen, doch sobald er allein im Zimmer ist, gehört die Schokolade ihm.

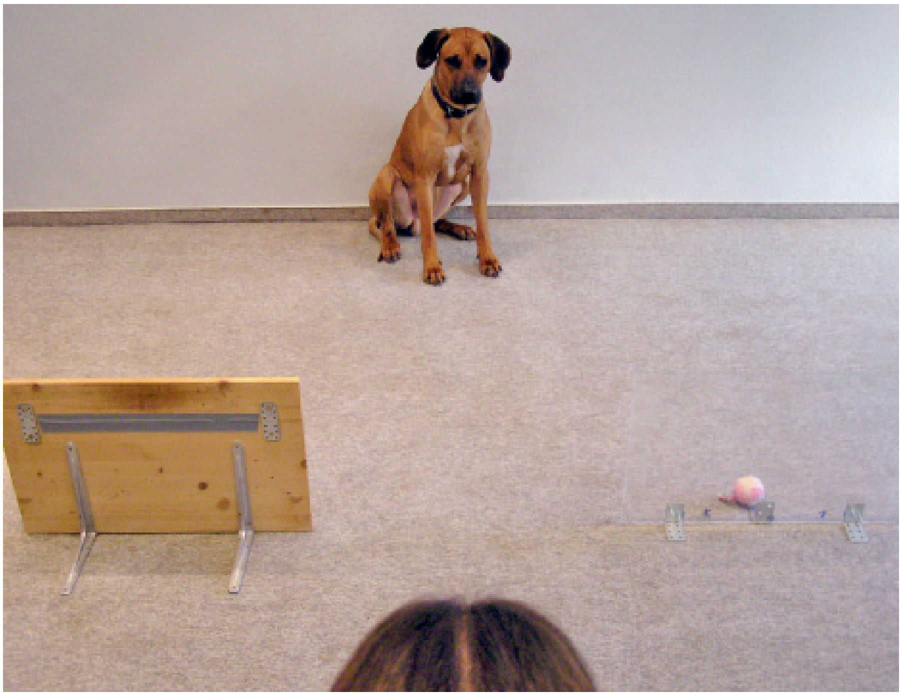
BRAVSEIN IST IMMER EINE FRAGE DES BLICKWINKELS

Der Versuchsaufbau für die Studie im Hundebungalow, mit dem Bräuer und Kaminski herausfinden wollten, ob Hunde wissen, was andere sehen können, war vergleichsweise einfach: Zu Beginn des Durchgangs wurde dem Hund ein Leckerli vor die Füße gelegt. Der Mensch verbot dem Hund das Fressen mit dem üblichen Kommando. Anschließend variierten die Menschen ihr Verhalten: Einmal drehte sich der Mensch einfach nur weg; dann verließ er ganz den Raum; und einmal saß er auf einem Stuhl und beschäftigte sich mit einem Gameboy-Spiel. „In jedem Fall war seine Aufmerksamkeit nicht auf den Hund gerichtet“, beschreibt Kaminski die wichtigste Bedingung in dieser Studie. Nur in der Kontrollbedingung schaute der Mensch den Hund an. Jeder Durchgang dauerte exakt drei Minuten.

„Zugegeben, das war kein besonders angenehmer Test für einen gut erzogenen Hund“, räumt Bräuer ein, „aber schließlich konnte er sich in der richtigen Situation über das Verbot hinwegsetzen. Genauso wie es mein Hund damals im Park getan hat.“ Tatsächlich verhielten sich Moras Artgenossen genauso. Statt also brav dazusitzen und den bloßen Ausblick auf das Leckerli zu genießen, klauten sie das Futter fast immer, wenn sie sich unbeobachtet fühlten, und so gut wie nie, wenn der Mensch sie ansah.

„Aus diesen Versuchen können wir schließen, dass Hunde offensichtlich auseinanderhalten können, ob ein

Foto: MPI für evolutionäre Anthropologie



Dass Hunde die Perspektive des Menschen verstehen, zeigte dieser Versuch. Meist brachten sie das Spielzeug, das hinter der Glaswand lag. Sie wussten offenbar, dass ihr Partner nur dieses sehen konnte und sich der Bringbefehl demnach nur darauf beziehen konnte.

Mensch sie ansieht oder nicht, und dass sie sich entsprechend unterschiedlich verhalten“, sagt Juliane Bräuer. Besonders interessant sei aber, dass sie sogar zwischen offenen und geschlossenen Augen unterscheiden können – eine bemerkenswerte Fähigkeit.

Doch allein diese Ergebnisse wollten die beiden Forscherinnen noch nicht als Beweis dafür werten, dass Hunde in solchen Situationen tatsächlich verstehen, was ein Mensch sehen kann oder nicht. Schließlich könnte es ja auch sein, dass die Hunde einfach nur auf die Augen ihres Partners reagierten, weil sie gelernt haben, dass er immer dann aufmerksam ist, wenn seine Augen zu sehen sind. Um herauszufinden, ob Hunde nun diesen kognitiven Perspektivwechsel hinbekommen oder nicht, setzten die beiden Forscherinnen eine weitere Versuchsreihe an. Diesmal als Spielsituation mit zwei Spielzeugen, die sie auf den Boden zwischen Mensch und Hund platzierten. Vor jedes Spielzeug stellten sie je eine Barriere: eine undurchsichtige, die dem Menschen den Blick auf das Spielzeug versperrte; die andere war transparent, sodass er den Gegenstand sehen konnte. Für den Hund, der auf der anderen Seite saß, waren beide Objekte gleichermaßen sichtbar.

REKORDWORTSCHATZ MIT ÜBER 200 WÖRTERN

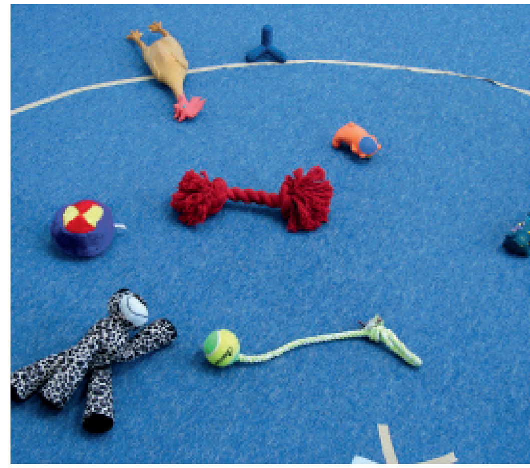
Nun forderte der Mensch den Hund mit dem Kommando „Bring’s“ auf, ihm eines der Spielzeuge zu apportieren – allerdings ohne dieses genauer zu bezeichnen. Wenn die Hunde etwas über die Perspektive des Menschen verstehen und darüber, was er sehen kann, sollten sie das Spielzeug hinter der durchsichtigen Barriere bevorzugen. Denn nur dieses ist in seinem Sichtfeld, und demnach kann sich sein Befehl nur darauf beziehen. Wenn der Hund jedoch nur auf den Stimulus Auge reagiert, dürfte er keines der beiden Spielzeuge bevorzugen und sie gleich oft apportieren, weil er die Augen seines menschlichen Spielpartners in Verbindung mit beiden Spielzeugen wahrnimmt.

Tatsächlich entschieden sich die Hunde häufiger für den Gegenstand, der sich vor der transparenten Barriere befand. Nun kann es aber sein, dass der Hund einfach die durchsichtige Barriere bevorzugte – etwa, weil das Spielzeug da heller aussah oder weil er so den Menschen besser im Blick hatte, während er es apportierte. Deshalb wurden zwei weitere Kontrollrunden eingeführt, bei denen der Hund keine Präferenzen für eines der Spielzeuge zeigen sollte.

In der einen Runde sah der Mensch beide Objekte, weil er auf der Seite des Hundes saß; in der anderen konnte er keines sehen, weil er mit dem Rücken zum Spielgeschehen saß. Die Hunde zeigten zwar eine gewisse Vorliebe für die durchsichtige Barriere, wenn der Mensch ihnen abgewandt war, jedoch war ihre Präferenz am größten, wenn der Mensch ihnen gegenüber saß und wirklich nur das Spielzeug hinter der transparenten Barriere sah. „Dieses Ergebnis könnte bedeuten, dass Hunde tatsächlich ein gewisses Verständnis

Foto: MPI für evolutionäre Anthropologie







Hunde bringen nicht nur Dinge, die ihnen mit Namen genannt werden, sie können auch über ein Ausschlussverfahren Bekanntes von Unbekanntem separieren und so neue Worte lernen. Auf Wunsch apportieren sie auch Dinge, die ihnen als Foto oder Modell gezeigt werden.

dafür haben, was der Mensch sehen kann", sagt Juliane Kaminski.

Ob sich Hunde damit als optimaler Partner für das Spiel „Ich sehe was, was du nicht siehst" empfehlen, mag dahingestellt sein, doch die Grundausstattung dafür bringen sie auf jeden Fall mit. Selbst über die Affenforschung auf den Hund gekommen, ist Bräuer seit zwei Jahren wissenschaftliche Betreuerin der Hundeforschung und koordiniert mit Susanne Mauritz die laufenden Projekte. Mauritz sorgt mit Aufrufen in den Medien dafür, dass interessierte Hundebesitzer sich für die beobachtenden Studien anmelden können. „Die Leute kommen gern, weil sie neugierig sind, was ihr Hund eigentlich alles kann, und weil sie wissen, dass ihr Hund bei uns gut betreut und geistig gefordert wird", erzählt Mauritz.

Im Lauf der Jahre haben die beiden Forscherinnen besonders talentierte Hunde kennengelernt. Diese sind nicht nur sehr gut im Interpretieren von menschlichen Gesten und Blicken, sondern verfügen auch über einen frappierenden passiven Wortschatz. „Manche sind in der Lage, mehrere hundert Objekte anhand ihres Namens zu unterscheiden", so Kaminski. Ungeschlagener Meister dieser Disziplin war Rico, ein neunjähriger Border Collie. Er konnte mehr als 200 verschiedene Spielzeuge anhand ihres Namens erkennen und zuordnen.

In einer Studie untersuchten Kaminski und ihre Kollegen, ob Rico Namen für neue Spielzeuge über ein Ausschlussverfahren lernen könne. Dazu verteilten sie neue und bekannte Spielzeuge in einem Raum, während der Border Collie mit seiner Besitzerin im Nebenraum wartete. Nun wurde er aufgefordert, ein Spielzeug zu bringen, dessen Namen er

Fotos: MPI für evolutionäre Anthropologie (3)

» Alles keine Frage der Intelligenz, sondern der bestmöglichen Anpassung an die Lebensumstände im Sinne der Evolution.

noch nie gehört hatte und das er auch noch nicht kannte. Tatsächlich löste Rico auch diese Aufgabe auf Anhieb und wedelte damit ganz nebenbei eine weitere Alleinstellungstheorie vom Tisch. Denn auch diese Art, Begriffe zu lernen – das *fast-mapping* –, galt bis dato als exklusive Fähigkeit des Menschen.

WAS HUNDE ÜBER DEN MENSCHEN VERRATEN

Wie weitere Versuche zeigten, war Rico zwar ein sprachliches Supertalent, aber durchaus nicht der einzige Hund mit dieser Begabung. Auch andere Vertreter seiner Art kamen beinahe an seinen Wortschatz heran. Dass die besten Ergebnisse dabei von anderen Border Collies erzielt wurden, gibt den Forscherinnen zu denken. Ob diese besonders talentierten Hunde alle der Rasse der Border Collies angehören, ist eine spannende, jedoch noch offene Frage, sagt Susanne Mauritz. „Allerdings vermeiden wir den Begriff der Intelligenz, wenn wir über unsere Studien reden."

Vielmehr geht es darum, herauszufinden, was eine Tierart an besonderen kognitiven Fähigkeiten mitbringt, die sie für ihr Überleben braucht. Und damit handelt es sich vor allem um Fragen der Spezialisierung und evolutionären Anpassung. Zum Beispiel zeigten in den Studien zur Mensch-Hund-Kommunikation die Hunde zwar meist bessere Resultate als andere Tierarten, taten sich aber dagegen vergleichsweise schwer bei Versuchen, bei denen soziales Lernen durch Nachahmung oder das Lösen von Problemen durch das Verständnis kausaler Zusammenhänge gefragt waren.

Gerade bei letzteren Versuchen schnitten die Menschenaffen wiederum sehr gut ab. Als die Forscher den Becher mit der Belohnung schüttelten, war den Affen sofort klar, dass da was drin sein musste. Dagegen konnten die Hunde nicht von dem Geräusch auf den Inhalt schließen. „Diese Ergebnisse lassen sich einfach erklären. Sie verdeutlichen, in welcher Umwelt die beiden Arten überleben müssen", erklärt Juliane Bräuer. Wegen der in einer Affengruppe herrschenden großen Futterkonkurrenz würde es einem Affen nicht im Traum einfallen, einem anderen eine Futterquelle zu zeigen. Dagegen ist kausales Verständnis bei der Nahrungssuche im Urwald hilfreich. So können die Tiere durch Schütteln herausfinden, ob es sich lohnt, die Nuss zu knacken.

Hunde müssen sich wiederum um Nahrungssuche und ähnliche Probleme nicht kümmern. Sie leben mit dem Menschen zusammen und bekommen von ihm, was sie brauchen. Dazu ist es aber von Vorteil, sich möglichst gut mit ihm zu verstehen. Auf diese Weise haben sich Hunde in den vergangenen 15 000 Jahren zu echten Kommunikationsprofis entwickelt.

Besonders interessieren sich die Leipziger Forscher jedoch für jene kognitiven Begabungen von Hunden, die man sonst nur beim Menschen findet – wie etwa das Verständnis von Zeigegesten. „Vielleicht können uns diese besonderen Fähigkeiten der Hunde sogar Auskunft über unsere eigene Entwicklung geben", hofft Bräuer. „Etwa darüber, was bei uns Menschen die natürliche Selektion beeinflusst haben könnte. Wir haben höchstwahrscheinlich die freundlichen aufmerksamen Hunde gefördert, die mit uns Kontakt aufnahmen. Vielleicht haben sich auch bei der Entwicklung des Menschen die freundlichen Individuen durchgesetzt und somit die beim Menschen sehr ausgeprägte Kooperationsbereitschaft hervorgebracht."

Noch sei es reine Spekulation, ob sich aus den Fähigkeiten der Hunde solche Schlussfolgerungen ziehen lassen. Vielleicht aber tragen die Arbeiten der Max-Planck-Wissenschaftler tatsächlich dazu bei, auch etwas über uns zu erfahren. ◂

GLOSSAR

Kognition
Kognition bedeutet Erkenntnisvermögen. Sie bezeichnet mentale Prozesse eines Individuums wie Gedanken, Meinungen, Wünsche und Absichten, aber auch informationsverarbeitende Vorgänge wie Problemlösen und Sprache. Diese Vorgänge befähigen ein Individuum etwa dazu, sein Verhalten flexibel anzupassen und aus der Auseinandersetzung mit der Umwelt zu lernen.

Ontogenese
Der Begriff beschreibt die Entwicklung des Individuums und seine Eigenschaften im biologischen und psychologischen Sinn. Er beschränkt sich jedoch nur auf die Entwicklung des einzelnen Individuums im Unterschied zur Phylogenese, die die Entstehung und Entwicklung einer Art bezeichnet.

Pongoland
Das Wolfgang-Köhler-Primaten-Forschungszentrum („Pongoland") ist ein Projekt des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie und in den Leipziger Zoo integriert. Die Forschung konzentriert sich in erster Linie auf Verhalten und Wahrnehmungsfähigkeit der vier Menschenaffenarten Schimpanse, Gorilla, Orang-Utan und Bonobo. Die Zoobesucher haben die Möglichkeit, die Tiere nicht nur in den Außen- und Innengehegen zu beobachten, sondern können außerdem einen Blick auf die Arbeit der Wissenschaftler werfen.



Wie lange ein Schüler
auf die Antwort seines
Meisters warten muss,
hängt nicht nur von
der Komplexität seiner
Frage ab, sondern –
wie die Linguisten aus
Nijmegen herausge-
funden haben – auch
von seiner Sprache.

Vielsagendes **Schweigen**

Das Telefonat zwischen zwei Freunden oder der Small Talk auf der Straße sind der Kitt jeder menschlichen Gemeinschaft. **Nick Enfield** und **Stephen Levinson**, Forscher am **Max-Planck-Institut für Psycholinguistik** im niederländischen Nijmegen, interessieren sich für solche alltäglichen Gesprächssituationen. Sie wollen wissen, wie Sprache, Kultur und Kognition zusammenhängen.

TEXT **KATRIN BLAWAT**

Irgendwann im Gespräch mit Nick Enfield kommen die Zweifel. Diese kleine Pause eben, bevor der gebürtige Australier geantwortet hat: War das nur ein Moment der Unachtsamkeit, des Nachdenkens? Oder steckte in der kurzen Verzögerung bereits eine Botschaft? Enfield, seine Kollegin Tanya Stivers und Direktor Stephen Levinson erforschen solche Fragen in dem Projekt „Multimodale Interaktion“. Oft mögen Alltagsgespräche inhaltlich banal und formal fehlerhaft sein, für die Psycholinguisten sind sie umso aufschlussreicher.

„Wie reine Informationen weitergegeben werden, kann man leicht anhand einzelner Sätze ohne Zusammenhang untersuchen“, sagt Enfield. „Wenn wir aber eine informelle Unterhaltung in der Gesamtsituation beobachten – also auch die Blickwechsel, Körperhaltung und -bewegungen – können wir daraus eine Menge über die Beziehung zwischen den Gesprächspartnern lernen.“

Vor neun Jahren hat Nick Enfield sein Büro im Max-Planck-Institut am Rande der Stadt Njimegen bezogen. Mitten in einem Wald steht das Institutsgebäude. Und so unscheinbar, wie es von der Straße aus wirkt, käme man nicht auf die Idee, dass ausgerechnet hier jene Essenz analysiert wird, die das Menschsein ausmacht. Denn eben dieses Ziel verfolgen Enfield und seine Kollegen, wenn sie geduldig Tage und Wochen damit verbringen, jedes „hm“ und „äh“ einer Unterhaltung in ihren Aufnahmen zu transkribieren.

OHNE KOMMUNIKATION KEINE GESELLIGKEIT

Der Mensch hat es als einzige Spezies geschafft, die Interaktion mit Artgenossen zur Perfektion zu bringen. „Diese unendlichen Möglichkeiten und der Wille, mit anderen zu kooperieren, um Freundschaften zu bilden, um andere zum eigenen Vorteil zu manipulieren oder sich mit Fremden auseinanderzusetzen, das findet nirgendwo sonst so ausgiebig statt wie in der menschlichen Gesellschaft“, sagt Nick Enfield.

Auf der Suche nach den Wurzeln dieses Geselligkeitstriebs ist Enfield schnell beim alltäglichen Sprachgebrauch gelandet – Zeichensprache, Gesten und Mimik wie das skeptische Stirnrunzeln oder die abwehrend gehobene Hand eingeschlossen. Interagieren und kooperieren können Menschen nur dank ihrer ausgeklügelten Fähigkeit zur Kommunikation, andernfalls würden sie ihre Handlungen höchstens zufällig einmal aufeinander abstimmen.

Wenn aber der Wille zur Kooperation ein Charakteristikum des Menschen ist und irgendeine Form von Sprache Ausdruck dieses Willens – liegt dann nicht die Vermutung nahe, dass es allgemeingültige Prinzipien für die menschliche Kommunikation gibt, quer durch alle Kulturkreise? Eine Art „universelle Infrastruktur“, wie der Max-Planck-Forscher es nennt, die in jeder menschlichen Gemeinschaft das Zusammenleben regelt.

Erste Anhaltspunkte, wie diese grundlegende Infrastruktur aussehen könnte, haben die Psycholinguisten bereits gefunden. Damit eine Unterhaltung problemlos funktioniert, müssen Sprecher und Zuhörer ihre Situation ähnlich einschätzen. Der Zuhörer muss erkennen, ob der Satz „Ich habe Durst“ eine reine Information darstellt – die Bitte, etwas zu trinken zu besorgen – oder die Frage, ob der andere ebenfalls durstig ist. Noch unverzichtbarer ist die Fähigkeit, die Intention des Sprechers richtig zu deuten, wenn Ironie, Sarkasmus oder einfach eine ungenaue Ausdrucksweise ins Spiel kommen – wie in beinahe jeder informellen Unterhaltung. >

Foto: Nick Enfield





In einer Computertomografie-Studie haben Levinson und sein Team untersucht, wie dieses unausgesprochene gegenseitige Verstehen erzielt wird. Wenn der Sender eine kommunikative Intention unkonventionellen Charakters zu erkennen gibt, finden sich bei ihm wie auch bei seinem Empfänger die gleichen Regionen des Gehirns aktiviert, wobei der Empfänger offenbar die Intentionen des Senders simuliert.

KLATSCH ALS KEIMZELLE DER KOMMUNIKATION

Die Fähigkeit, sich in die Gedankenwelt des Gegenübers versetzen zu können, beschreiben Wissenschaftler mit der *Theory of Mind*, und für Enfield und seine Kollegen ist sie einer der wichtigsten Bestandteile im menschlichen Kommunikations- und Kooperationsverhalten.

Woran aber erkennt etwa der Zuhörende, dass sein Gegenüber gleich zu sprechen aufhört und er selbst an der Reihe ist, etwas zu sagen? Nick Enfield untersuchte diese Frage mithilfe eines Experiments, für das er Probanden Mitschnitte eines Telefongesprächs zweier niederländisch sprechender Freunde vorspielte. Die Testpersonen sollten in dem Moment einen Knopf drücken, in dem sie glaubten, dass der Sprechende gleich enden würde.

Damit stellte der Versuch eine Situation nach, wie sie in jeder Unterhaltung auftritt: Weil man in einer einfachen, zwanglosen Unterhaltung etwa ein halbe Sekunde braucht, um eine Antwort auf das Gehörte zu produzieren, muss man das Gesprächsende seines Partners vorhersehen, um lange Pausen zu vermeiden.

„Eine ideale Unterhaltung kommt ohne Gesprächslücken und ohne Überschneidungen der Teilnehmer aus“, sagt Enfield. Natürlich gebe es dennoch immer wieder Pausen in einer Unterhaltung, aber die hätten dann meist auch eine Bedeutung. Eine Erkenntnis aus Enfields Untersuchungen lautet nämlich, dass zustimmende Antworten auf Ja-Nein-Fragen in allen Kulturen schneller geäußert werden als ablehnende Antworten. Bemerkt der Sprecher also die kurze Pause von ein paar Millisekunden, kann er wiederum die Antwort seines Partners vorausahnen.

In seinem Versuch manipulierte Enfield die Tonspuren, sodass im einen Fall die Wörter unverständlich wurden, während alle anderen Merkmale wie Tonhöhe, Lautstärke und Dauer des Gesagten konstant blieben. Daraufhin fiel es den Probanden deutlich schwerer als bei der unbearbeiteten Tonspur, das Gesprächsende zu antizipieren. Änderte Enfield hingegen die Tonhöhe, bereitete dies den Versuchspersonen keine Probleme.

Demnach geben also eher einzelne Wörter und nicht die Tonhöhe einen Hinweis darauf, dass sich ein Sprecher dem Ende seines Beitrags nähert. „Zumindest gilt das für Niederländisch und wahrscheinlich auch für andere westeuropäische Sprachen“, so Enfield. „Wie es aber zum Beispiel im Japanischen aussieht, bei dem man eine Menge Wörter einfach auslassen kann, wissen wir noch nicht.“

Dennoch gibt es eine Gemeinsamkeit, stellten die Psycholinguisten fest. „Alle Sprachen haben den Zweck, sicherzustellen, dass der Mensch seinen Willen zur Kooperation auch ausleben kann“, sagt der Max-Planck-Forscher und verweist auf den Anthropologen Robin Dunbar. Der vermutet, dass sich Sprache vor 200 000 bis 400 000 Jahren als ein Instrument entwickelt hat, um in einer größeren Gemeinschaft soziale Angelegenheiten regeln zu können. Klatsch und Tratsch waren demnach der Motor jener Entwicklung, die in einer halben Million verschiedener Sprachen irgendwann ihren Höhepunkt gefunden hat.

Heute werden weltweit noch etwa 6000 Sprachen gesprochen, schätzen Linguisten. Und nur bei etwa zehn Prozent hat sich jemand die Mühe gemacht, eine Grammatik und umfang-



1 Kommunikation als sozialer Kitt – nach Beobachtung der Sprachforscher haben alle Sprachen den Zweck, sicherzustellen, dass der Mensch seinen Willen zur Kooperation auch ausleben kann.

2 Filmaufnahmen wie hier beim Gesangsfestival auf Rossel Island bilden für die Forscher eine wichtige Arbeitsgrundlage.

3 Bei aller Verschiedenheit dienen alle Sprachen der Welt nach Auffassung der Linguisten dem gleichen Zweck: der Organisation der Gemeinschaft.

reiche Vokabellisten zu erstellen. Laut der Datenbank *Ethnologue* werden 82 Prozent aller Sprachen von Gemeinschaften mit weniger als 100 000 Mitgliedern gesprochen, knapp 40 Prozent gar von solchen mit weniger als 10 000 Mitgliedern.

ALBTRAUM DER PSYCHOLOGEN

Nick Enfield weiß nur zu gut, was es bedeutet, in solchen Gemeinschaften Sprachen wie Kri zu erforschen, das nur 300 Menschen in einem abgelegenen Teil Südostasiens sprechen. In Enfields Büro erinnern Fotos von farbenfroh gekleideten, dunkelhäutigen Kindern mit großen Strohhüten an die jährliche „Feld-Saison“, wenn der Wissenschaftler die Niederlande verlässt, um einige Wochen in der fremden Kultur zu verbringen. Anfangs hat er sich über die deutlichen Hierarchien gewundert, die in jedem scheinbar bedeutungslosem Wortgeplänkel zutage traten: Der Höherrangige thronte über seinem Gesprächspartner – selbst wenn der andere im wörtlichen Sinne auf der Straße knien musste.

Den Alltag der Menschen in Asien oder Afrika verfolgen die Wissenschaftler mit der Videokamera. Wer fängt ein Gespräch an, wohin guckt er dabei, wie und wann reagiert der Angesprochene? „Dabei wird man zwangsläufig ein Teil der fremden Gesellschaft“, sagt Enfield. „Schließlich wohnen wir bei den Menschen, über die wir forschen, wir essen und feiern mit ihnen.“ Für Psychologen seien solche Versuchsbedingungen ein Albtraum, weil sie zu unkontrolliert seien. Da alles in Echtzeit läuft, lässt sich keine Situation wiederholen.

Mit hunderten Stunden Videoaufzeichnungen kehren die Forscher schließlich an ihre Schreibtische zurück. Und dann beginnt der aufwendigste Teil der Arbeit. Wie Zoologen, die nach einer Exkursion daheim am Mikroskop die Beine der gesammelten Käfer millimetergenau vermessen müssen, übertragen die Psycholinguisten ihre Videoaufnahmen in ein Protokoll – auf Millisekunden genau. Wer ihre Aufzeichnungen betrachtet, wundert sich, wie unvollständig die Sätze eines Gesprächs meist sind. Keine Pause, kein Gestotter überspringen die Forscher, doch diese Sorgfalt kostet Zeit. Eine Minute Videoaufnahmen exakt zu transkribieren dauert etwa zwei Stunden.

Manchmal fühlt sich Enfield wie ein Tiefseeforscher, der in einer fremden Welt exotische Arten entdeckt hat: Lebewesen, die vollkommen anders aussehen als alle bekannten – und die trotzdem wie alle Organismen das Ziel verfolgen, zu überleben und sich fortzupflanzen. Mit den Sprachen dieser Welt sei es ähnlich, sagt Enfield. Strukturelle Ähnlichkeiten zwischen einer westeuropäischen Sprache und Kri wird man kaum finden, doch im hochindustrialisierten Westen wie im asiatischen Busch dient die jeweilige Sprache dazu, zwischenmenschliche Aktivitäten zu organisieren.

Wolle man hingegen reine Sachinformationen austauschen, sei zumindest die gesprochene Sprache nicht unbedingt notwendig. Der Wissenschaftler weiß das aus eigener Erfahrung, wenn er erstmals ein fremdes Land besucht und sich die neue Sprache erst aneignen muss. „Das ist immer anstrengend, aber es macht Spaß“, sagt er. „Man weiß, dass man Fortschritte machen wird, sobald man etwas Zeit investiert.“

CHOMSKYS TIEFENGRAMMATIK IST TOT

Dank ihrer Erfahrung in der Feldforschung stellen die Max-Planck-Forscher mit ihrer Theorie einer allgemeingültigen Infrastruktur des Sprachgebrauchs eine gängige Theorie der Linguistik infrage. Noch immer dominiert Noam Chomskys Idee einer einzigen, für alle Sprachen gültigen Tiefengrammatik. Die Anhänger der Chomsky-Lehre behaupten, universelle Gemeinsamkeiten in der Sprachstruktur herausarbeiten zu können. So verfügten alle Sprachen

Fotos: Stephen Levinson (3)



Es braucht keine räumliche Nähe, um sich zu verstehen. Wichtiger ist es, dass die Intentionen des Redenden vom Zuhörer richtig gedeutet werden.



Experte für die Zwischentöne menschlicher Sprache: der Australier Nick Enfield.

über Strukturen wie Nomen, Verben, Adjektive und Hilfsverben und über Regeln für die Wortstellung im Satz.

Falsch, sagt der Linguist und Anthropologe Stephen Levinson, Direktor am Max-Planck-Institut in Nijmegen, und nennt Beispiele aus Sprachen, die Ungeübte nicht einmal aussprechen können: „In Riau-Indonesian gibt es keine Regeln für die Wortstellung, und die australischen Sprachen Kayardild und Bininj Gun-wok kennen keine Hilfsverben, in Lao verwendet man statt Adjektiven eine spezielle Verbform.“

Zudem gibt es einige Besonderheiten, die sich kein Erfinder einer künstlichen Sprache ausdenken würde, weil sie auf den ersten Blick zu abstrus erscheinen. So kennt man in der Indianersprache Kiowa keine einheitliche Form für den Plural. Stattdessen wird markiert, ob es sich um eine ungewöhnliche Anzahl für ein spezielles Objekt handelt, etwa mehr als zwei Beine oder nur zwei einzelne Kieselsteinchen.

Stephen Levinson unterstellt allen Sprachen einen gemeinsamen Zweck: die Organisation der Gemeinschaft. Doch dass es auch auf struktureller Ebene eine Universalität geben sollte, die oben beschriebene Chomsky’sche Tiefengrammatik also, halten er und Nick Enfield für einen Mythos. „Sprachen unterscheiden sich so erheblich auf jeder strukturellen Ebene, dass es uns schwer fällt, überhaupt ein Merkmal zu finden, das allen gemeinsam ist“, sagt der Max-Planck-Direktor. „Wir sind die einzige Art, deren Kommunikationssysteme sich fundamental in Form und Inhalt voneinander unterscheiden. Wer über die Evolution von Sprache nachdenkt und diesen Umstand ignoriert, übersieht genau das Merkmal, das unsere Art auszeichnet.“

Unterstützung bekommt Stephen Levinson von Michael Tomasello. Der Direktor am Leipziger Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie stellt entschieden fest: „Die Tiefengrammatik ist tot. Wissenschaftler können nicht sagen, was genau universell daran sein soll – und sie haben auch keine Methoden, um es herauszufinden.“

MIT DER STOPPUHR AM PULS DER SPRACHE

Die von Levinson und Enfield postulierte universelle Infrastruktur hingegen ist tiefer liegend, das heißt, weniger offensichtlich. Sie zeigt sich etwa in der Zeitverzögerung, die bis zu einer Antwort vergeht. Und die Forscher wissen, wie sie diese universelle Infrastruktur belegen könnten: wenn sich zeigen ließe, dass es Regeln für den informellen Sprachgebrauch gibt, nach denen sich Menschen aller Kulturen richten. Um für solche interkulturellen Untersuchungen gerüstet zu sein, spricht jeder der Psycholinguisten eine Handvoll exotischer Sprachen. So ist Enfield Experte für Lao und Kri, kann sich aber auch auf Hindi und Chinesisch verständigen. Sein Chef Levinson hat sich bislang auf Sprachen der Maya und die der Bewohner Neu-Guineas spezialisiert.

Doch selbst wenn die Wissenschaftler sich problemlos verständigen können, ist der Aufwand von interkulturellen Studien sehr hoch. Eine Studie nur in einer westeuropäischen Sprache zu organisieren sei hingegen kein Prob-

Foto: Privat





lem, sagt Enfield, da strömten die Probanden wie von selbst herbei. Dass aus diesem Grund die meisten Ergebnisse aus Untersuchungen dieses vergleichsweise kleinen Kulturkreises stammen, nennt er jedoch „Ethnozentrismus“.

Um dieses Problem zu vermeiden, hat Nick Enfield die Fragestellung in einer seiner zuletzt veröffentlichten Studien auf insgesamt zehn Sprachen aus fünf Kontinenten ausgeweitet: Italienisch, Englisch, Dänisch und Japanisch wurden ebenso untersucht wie Sprachen aus Mexiko, Südostasien, Namibia und Papua-Neuguinea. Die Psycholinguisten wollten wissen, wie viel Zeit in den verschiedenen Sprachräumen vergeht, ehe ein Gesprächspartner auf eine einfache Ja-Nein-Frage reagiert. Um möglichst lebensnahe Bedingungen zu untersuchen, analysierten die Forscher reale Situationen, die sie zuvor in den einzelnen Kulturen gefilmt hatten.

So diskutieren zwei Männer in Lao darüber, welche Route sie mit ihrem Lkw wählen sollen, um ins nächste Dorf zu gelangen. Die Ergebnisse unterstützen Enfields These einer grundlegenden Infrastruktur im alltäglichen Sprachgebrauch: Auf Fragen, die sich mit ja oder nein beantworten ließen, reagierten die Angehörigen aller Sprachräume im Schnitt nach 208 Millisekunden. „Diese Zeitspanne ist offenbar eine universelle Gesetzmäßigkeit“, sagt der Wissenschaftler.

Allerdings offenbarte die Studie auch geringe, kulturspezifische Unterschiede. Am schnellsten antworteten die Japaner, am langsamsten die Dänen. „Die Infrastruktur des Sprachgebrauchs, wie wir sie uns vorstellen, ist ja nichts Fixes, sondern ein Bündel von Prinzipien, die sich zu lokalen Besonderheiten auswachsen können und so eine Kultur prägen“, erläutert Stephen Levinson das Ergebnis.

Wie eng Sprachgebrauch und Kultur im Alltag miteinander verwoben sind, dafür wollen Nick Enfield und fünf weitere Wissenschaftler im Rahmen eines neuen Forschungsprojekts weitere Belege sammeln. Von Januar an leitet Enfield das vom Europäischen Forschungsrat mit zwei Millionen Euro finanzierte Projekt *Human Sociality and Systems of Language Use*.

Wessen Aufgabe ist es, in einer zwanglosen Unterhaltung Missverständnisse auszuräumen? Wie ausdrücklich kann ein Gesprächspartner einen Wunsch äußern? Wieder wollen die Psycholinguisten diese Fragen für insgesamt sieben verschiedene Sprachen beantworten. Enfields Technikkiste mit der Videokamera steht schon bereit. Bald wird der Forscher die Kinder in der bunten Kleidung, deren Fotos am Aktenschrank in seinem Büro hängen, in Laos wiedertreffen. ◂

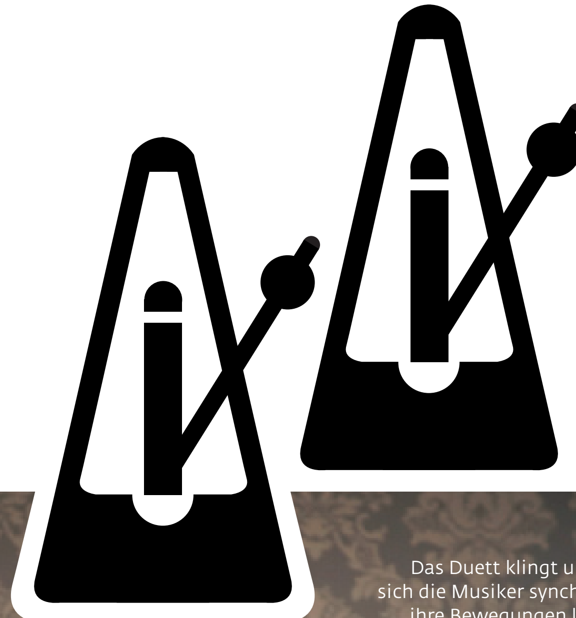
GLOSSAR

Theory of Mind (ToM)
Die Fähigkeit, sich in die Gedankenwelt des Gegenübers hineinzudenken, seine Absichten zu erkennen und das eigene Handeln danach auszurichten. Kinder haben erst mit etwa vier Jahren eine vollständig entwickelte ToM, wenn sie die Überzeugungen und Annahmen eines anderen Menschen als nicht zutreffend identifizieren können.

Tiefengrammatik
Angeborene Fähigkeit des Menschen, mithilfe weniger grammatischer Regeln und einem begrenzten Wortschatz neue Sätze zu bilden. Als Beleg für die Tiefengrammatik führte der Linguist Noam Chomsky an, dass jedes gesunde Kind jede beliebige Sprache als Muttersprache erlernen kann. Oft wird unter Tiefengrammatik aber auch ein Bündel von Prinzipien verstanden, die allen Sprachen der Welt gemein sind (etwa bestimmte Satzbau-Regeln, lexikalische Einheiten wie Nomen, Verb etc.). Diese Auffassung kritisieren viele Forscher aufgrund mangelnder Beweise und Gegenbeispielen.

Transkribieren
Das Übertragen von Audioaufnahmen gesprochener Sprache in die Schriftform, im Falle der Wissenschaftler Levinson und Enfield sogar inklusive aller Gesprächspausen, Füllwörter und unvollständiger Satzfragmente. Für Psycholinguisten der zeitaufwendigste Arbeitsschritt einer Studie.

Fotos: Nick Enfield (2)





Das Duett klingt umso besser, je mehr sich die Musiker synchronisieren und sich ihre Bewegungen beim Spiel gleichen.

Denn ich weiß, **was du tust**

Wenn Menschen kooperieren, müssen sie ihre Handlungen ganz genau miteinander abstimmen. Direktor **Wolfgang Prinz** und seine Mitarbeiter am **Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften** in Leipzig erforschen, was dabei in den Köpfen vorgeht.

TEXT **PETER ZEKERT**

Wer ein Duett oder im Ensemble spielen will, muss mit anderen harmonieren. Nur wenn jeder Ton zum Spiel der Musikerkollegen passt, gehen die Klänge ineinander auf. Aber nicht nur Musiker brauchen ein feines Gespür für andere Menschen, sondern jeder von uns im Alltag: Unser tägliches Leben besteht aus einer Abfolge von kleinen und größeren sozialen Interaktionen, in denen wir uns immer wieder intuitiv auf andere Personen einstellen.

Ob wir als Fußgänger entgegenkommenden Passanten ausweichen, jemandem die Hand geben, zu zweit ein Sofa die Treppe hochtragen, tanzen oder Basketball spielen: Jede unserer Handlungen muss dabei mit denen der anderen Menschen abgestimmt sein. Aber woher wissen wir immer so schnell, was diese tun werden? Für solche Basisprozesse des gemeinsamen Handelns interessiert sich Wolfgang Prinz. Der Direktor am Leipziger Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften erforscht soziales Verhalten auf der Mikroebene. Denn hinter dem täglichen Miteinander steckt viel mehr kognitive Arbeit, als wir bemerken.

Dass sich unsere Handlungen mit denen anderer zu einem Ganzen zusammenfügen, funktioniert zwar meist wie von selbst und fällt uns höchstens auf, wenn es schiefgeht, wenn das Musikensemble falsche Töne produziert, unser Pass zum Mitspieler ins Aus geht oder der Fuß auf den Zehen des Tangopartners landet.

DENKPROZESSE VERLÄNGERN DIE LEITUNG

Genau besehen ist es mehr als erstaunlich, wie wort- und mühelos die Abstimmung im Normalfall gelingt – und das innerhalb von Sekundenbruchteilen. Dafür genügt es nicht, feine Antennen und eine schnelle Reaktionsfähigkeit zu haben. „Menschen können deshalb so reibungslos mit anderen zusammen agieren, weil sie meistens schon im Voraus wissen, was der andere tun wird“, sagt Wolfgang Prinz.

Hinter dieser Fähigkeit stecken zum großen Teil unbewusst ablaufende Mechanismen, die erst seit einigen Jahren erforscht werden. Denn lange ging man in der Psychologie von einem linearen Schema aus: „Als klassisch galt die Abfolge Perzeption – Kognition – Aktion“, erzählt der Max-Planck-Forscher. Handlungen, die wir bei anderen wahrnehmen, müssten demnach zunächst einen komplexen Denkprozess durchlaufen, um verstanden zu werden.

Daraufhin müssten wir zwischen den verschiedenen Handlungsmöglichkeiten abwägen und die entsprechenden Bewegungen einleiten, um schließlich zu reagieren. „Für viele der täglichen blitzschnellen Interaktionen wäre dieser Prozess aber schlicht zu langsam“, sagt Prinz.

Er kam früh zu der Überzeugung, dass es eine Abkürzung geben müsse, die von der Wahrnehmung einer Handlung bei anderen direkt zur eigenen Aktion führt. Schon Anfang der 1990er-Jahre formulierte der Wissenschaftler die Theorie des *Common Coding*, nach der Wahrnehmen und Handeln zumindest teilweise durch gemeinsame kognitive und neuronale Ressourcen verbunden seien.

Anfangs stand er mit dieser Ansicht recht allein da. Doch das änderte sich kurz darauf schlagartig, als bei Makaken-Affen Hirnzellen gefunden wurden, die genau das taten, was Prinz theoretisch vorausgesagt hatte: Die sogenannten Spiegelneuronen wurden

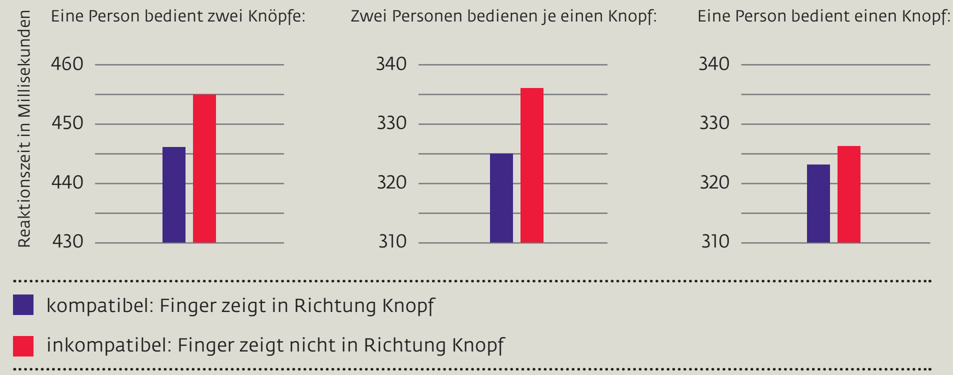
Foto: Corbis

bei den Primaten sowohl aktiv, während sie selbst nach einem Stück Obst griffen, als auch dann, wenn sie nur beobachteten, wie ein Artgenosse dieselbe Handlung ausführte. Beim Menschen ist man bis jetzt noch auf der Suche nach den Neuronen mit der Doppelfunktion. Doch dass es sie gibt, gilt als sicher. Auch beim Menschen kann das bloße Wahrnehmen einer Handlung dieselben motorischen Areale aktivieren, die auch für ihre Ausführung zuständig sind.

Die Folgen lassen sich im Alltag beobachten: Jeder hat wohl schon einmal erlebt, wie ansteckend etwa Gähnen oder Lachen wirken können. Auch wenn wir in einem Gespräch die Sitzhaltung und Bewegungen eines Gegenübers betrachten, imitieren wir beides oft unwillkürlich. Das Zentrum des menschlichen Spiegelsystems wird im prämotorischen Kortex vermutet. Dieses Areal hat sich inzwischen in vielen Studien als Dreh- und Angelpunkt zwischen Sinneswahrnehmung und Handlungssteuerung erwiesen.

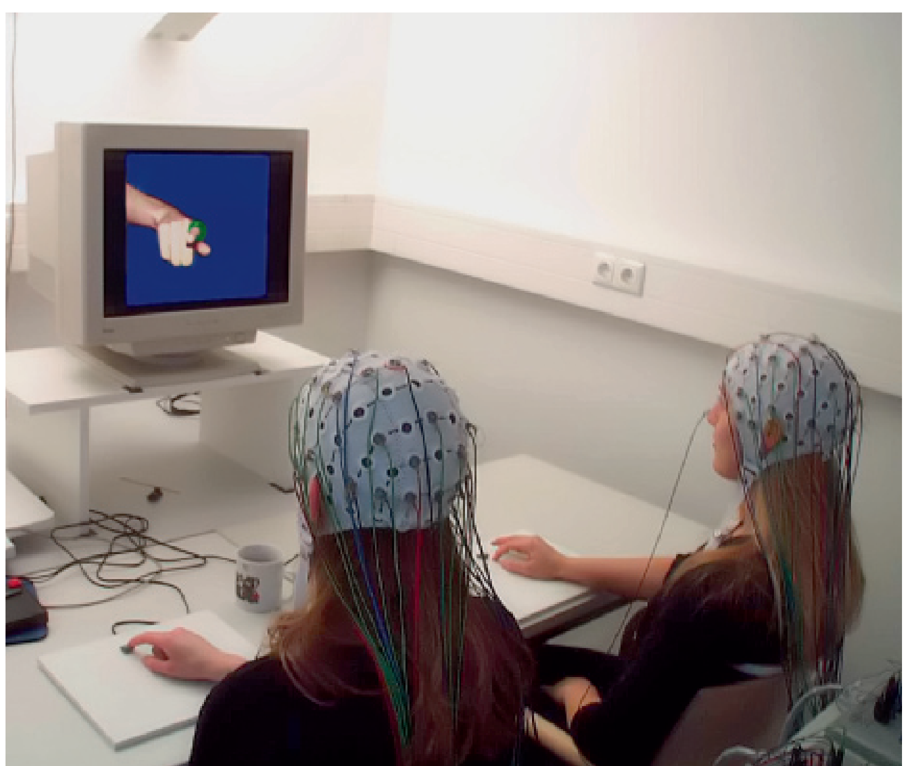
ALLES SCHON MAL IM GEIST DURCHSPIELEN

Als direkter Nachbar des motorischen Kortex, des Bewegungszentrums unseres Gehirns, verbindet er den audiovisuellen Input mit der Planung und Ausführung unserer Bewegungen. Deswegen wird ihm eine Schlüsselfunktion zugeschrieben für unseren Umgang mit anderen Menschen.
Heute nimmt man an, dass im prämotorischen Kortex Simulationsprozesse stattfinden, die uns helfen, das Handeln anderer zu verstehen. „Das Verhalten der anderen wird dabei in Handlungsziele übersetzt", erklärt Wolfgang Prinz. „Indem man fremdes Tun selbst innerlich durchspielt, wird es schneller verstanden als durch logisches Verstehen. Aus der inneren Simulation lässt sich dann ableiten, was eine Person wahrscheinlich als Nächstes tun wird."



Wie solche Vorgänge unser Handeln unmerklich beeinflussen, wenn wir uns mit anderen eine Aufgabe teilen, untersuchte erstmals Natalie Sebanz, eine ehemalige Doktorandin von Prinz. Heute erforscht sie das gemeinsame Handeln in einer eigenen Gruppe an der niederländischen Universität Nijmegen. Sie entwarf dafür ein Reiz-Reaktionsexperiment, das sie mal von einer Person allein und mal von zwei Personen zusammen ausführen ließ.

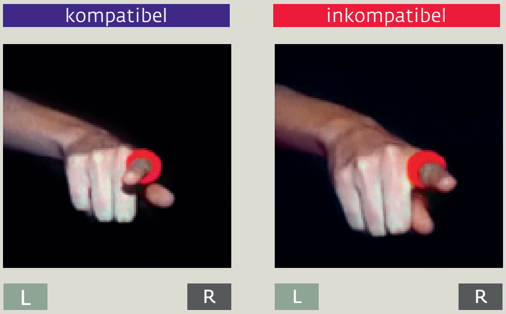
Dabei wurden den Probanden Bilder von einer Hand präsentiert, an deren Zeigefinger entweder ein roter oder ein grüner Ring steckte. Je nachdem, welche Farbe erschien, sollten die Probanden so schnell wie möglich entweder einen Knopf zu ihrer Linken oder zur Rechten drücken. Dabei war eine Schwierigkeit eingebaut: Der Finger trug nicht nur den jeweiligen Ring, sondern zeigte auch nach links oder rechts. „Eigentlich ist die Zeigerich-



Bei zwei Spielern behält der eine die andere Person immer im Sinn. Auch als die Probanden nicht an der Reihe waren, simulierte ihr Hirn die Handlung des Anderen mit.

Grafiken und Fotos: MPI für Kognitions- und Neurowissenschaften

Im Experiment der Wissenschaftlerin Natalie Sebanz sollte eine Versuchsperson je nach Farbe des Rings einen Knopf zu ihrer Linken beziehungsweise zur Rechten drücken. Obwohl die Zeigerichtung des Fingers dabei völlig irrelevant war, verlängerte sich die Reaktionszeit, wenn der Finger nicht in die Richtung des zu drückenden Knopfes wies (linkes Diagramm). Der Proband konnte also die durch den Zeigefinger vermittelte räumliche Information nicht ausblenden. Dieses Phänomen ist als „Simon-Effekt" bekannt.
Im rechten Diagramm verschwindet dieser Effekt, da die Person nur einen der beiden Knöpfe zu bedienen hat. Besonders interessant ist das mittlere Diagramm: An diesem Experiment nehmen zwei Personen teil, von denen aber jede nur einen Knopf bedient. Hier tritt der Effekt wieder auf. Der Grund: Zeigt der Finger auf die andere Person, obwohl man selbst am Zug wäre, verlängert dies erneut die Reaktionszeit. Beide Personen handeln wie eine Person, die zwei Hände koordiniert.



tung des Fingers für die Probanden irrelevant, sie sollen ja nur auf den Farbreiz reagieren", sagt die Forscherin. Doch räumliche Information lässt sich nicht ausblenden – das ist als der Simon-Effekt bekannt.

Wies der Finger auf dem Bildschirm also nach links, obwohl rechts der Knopf zu drücken war, verzögerte das die Reaktion bei den Probanden. „Dieser Effekt war deshalb für soziale Prozesse interessant", so Natalie Sebanz, „weil er nur dann auftritt, wenn eine Person für beide Knöpfe zuständig ist." Bedient der Proband dagegen nur einen der beiden Knöpfe, verschwindet der Simon-Effekt.

In Sebanz' Experiment zeigte sich nun, dass der Effekt sofort zurückkehrt, sobald man dem Probanden einen Partner an die Seite setzt. „Wenn der Farbreiz mir sagt, dass ich dran bin, aber der eingeblendete Finger auf die Person neben mir zeigt, dauert es wieder einen Moment länger, bis ich reagiere", erklärt Sebanz. Zwei Personen zusammen handelten im Experiment so wie eine Person, die zwei Hände zu koordinieren hatte.

Das liegt daran, dass beide Teilnehmer nicht nur ihre eigene Aufgabe im Kopf hatten, sondern auch den Teil, für den der andere zuständig war. Korepräsentation heißt dieses Phänomen: Selbst wenn es sich um eine Aufgabe handelt, bei der es eher hinderlich wirkt, behält man die andere Person auf dem Schirm – und zwar immer. Auch als die Probanden nicht an der Reihe waren, simulierte ihr Hirn die Handlung des anderen mit.

Weil bereits das Beobachten oder Vorstellen der Handlung des anderen die eigenen motorischen Areale für diese Handlung aktiviert, entsteht ein Impuls, die Handlung selbst auszuführen. Damit wir nicht sofort alles imitieren, was wir bei anderen beobachten, muss dieser Handlungsimpuls unterdrückt werden. Die erhöhte Hirnaktivität, die dafür nötig ist, ließ sich im EEG messen.

Für das Leben in sozialen Gruppen könnte die Korepräsentation so grundlegend gewesen sein, dass sie sich im Verlauf der Evolution automatisierte und fest ins Gehirn des Menschen einschrieb, vermutet die Forscherin. „Mit anderen zu kooperieren liegt in unserer Natur."

DAS SPIEL DER ANDEREN IMMER IM SINN

Das Sebanz-Experiment schuf die Grundlage für vielfältige Forschungen zum gemeinsamen Handeln. Wie sich Korepräsentation bei geteilten Aufgaben auswirkt, wird in vielen Facetten untersucht. Eine von ihnen ist das gemeinsame Musizieren. Studien mithilfe der funktionellen Magnetresonanztomografie haben inzwischen gezeigt, dass die Simulationsaktivität im menschlichen Gehirn dann am stärksten ausfällt, wenn die Handlungen, die wir bei anderen wahrnehmen, auch zu unserem eigenen Handlungsrepertoire gehören. Spielt man etwa musikalischen Laien und geübten Pianisten eine Sonate vor, ist bei Letzteren die Aktivität in den motorischen Arealen deutlich größer als bei den Nichtmusikern – sie spielen innerlich mit.

„Musiker, die mit anderen im Duett oder Ensemble spielen, sind ein gutes Beispiel für komplexe und in Echtzeit ablaufende Koordination beim gemeinsamen Handeln", sagt Peter Keller, Leiter der Nachwuchsgruppe „Musikkognition und Handlung" am Leipziger Max-Planck-Institut. Der gebürtige Australier kommt aus einer musikalischen Familie. Die Schwester ist in der Heimat eine gefeierte Jazzpianistin, er selbst studierte erst Posaune, dann Musikwissenschaft. „In den vielen Stunden, die wir damals übten, wurde mir immer klarer, dass gemeinsame Konzerte nicht nur erfordern, das eigene Instrument zu beherrschen, sondern eine komplexe Form sozialen Handelns sind."

Sich mit anderen Musikern in Einklang zu bringen ist ein sehr anspruchsvoller Prozess, erklärt Keller, weil zwar einerseits zeitlich alles sehr präzise aufeinander abgestimmt sein müsse, die Musiker aber andererseits immer wieder aus dem Regelmäßigen ausbrechen. „Sonst würde ihr Spiel mechanisch wirken, ohne individuellen Ausdruck."

Wenn sie dann eine Note etwas länger halten, spontan das Tempo wechseln und lauter oder leiser werden, müssen sich alle immer wieder aufs Neue einander anpassen. Das erfordert von den Musikern permanente Aufmerksamkeit – und zwar gleich mehrfach: Nicht nur muss jeder der Spielenden auf die Klänge achten, die er selbst

produziert, sondern zugleich auch die der anderen und den Gesamtklang überwachen. „Dafür musste es auch eigene kognitive Ressourcen geben", sagt Peter Keller.

Um herauszufinden, wie sich Musiker untereinander synchronisieren und welche Unterschiede und Gemeinsamkeiten es dabei zwischen verschiedenen Situationen wie Klavierduett, Ensemble oder Chor gibt, werden immer wieder Musiker zu kleinen Konzerten ins Labor eingeladen. Dabei wird auf meist kaum hörbare Nuancen geachtet. Die Forscher benutzen für ihre Tests etwa elektrische Klaviere, weil sich Tastendruckzeiten und die Intensität des Tastenanschlags auf diese Weise sehr genau registrieren und sich auch kleinste Asynchronitäten im Spiel erfassen lassen, die es immer gibt und die sich bei guten Musikensembles im Schnitt zwischen 30 und 50 Millisekunden bewegen.

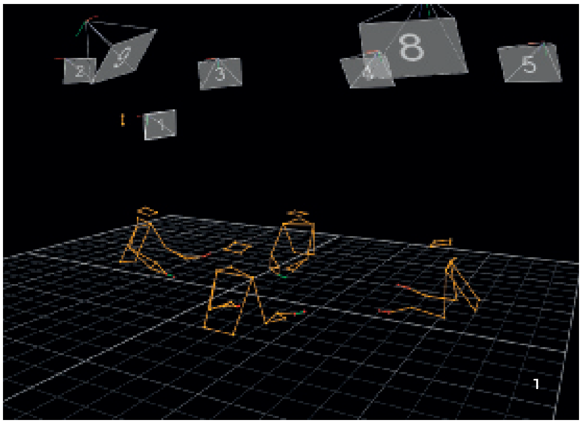
JEDER IST SEIN EIGENER BESTER DUETTPARTNER

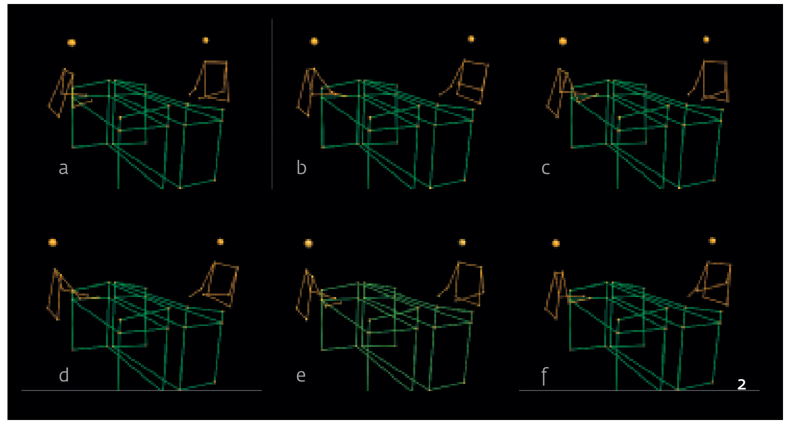
So haben die Wissenschaftler vor Kurzem erstmals gezeigt, dass Handlungssimulation auch für zeitliche Koordination von Handlung wichtig ist. Für die Studie spielten Pianisten jeweils einen Part von mehreren für sie bis dahin unbekannten Duetten ein. Einige Monate später wurden sie erneut eingeladen, um den komplementären zweiten Part zu spielen. Mit dem ersten Teil, der vom Band kam, konnten sie sich am besten synchronisieren, wenn es der eigene, von ihnen selbst eingespielte war.

„Das simulierte Timing trifft mit dem tatsächlichen Verhalten dann am besten überein, wenn beide das Produkt desselben kognitiv-motorischen Systems sind", sagt Keller. Jeder war sein eigener idealer Duettpartner. Wie Keller und seine Mitarbeiter zudem beobachtet haben, schaffen es im Duett spielende Pianisten umso besser, sich mit ihrem Partner zu synchronisieren, je ähnlicher sich ihre Bewegungen beim Spielen sind. Die kleinen Unterschiede des Vor- und Zurückwiegens des Oberkörpers, das wahrscheinlich dabei hilft,



Mit am Körper der Musiker angebrachten Motion Capturing Markern, wie sie normalerweise für lebensechte 3-D-Animationen benutzt werden, erfassen die Wissenschaftler die feinsten motorischen Nuancen des Zusammenspiels.





1 Bilder eines Ensembles von Gamelan-Musikern, wobei sich die Forscher hierbei speziell für die Interaktion mehrerer Musiker während des Spielens interessieren.

2 Standbild aus einer kinetischen Animation eines Pianoduos. Sie zeigt, wie sich die Körperbewegungen der beiden Musiker im Duett aufeinander beziehen.

den Takt zu halten, erfassten die Forscher mit am Rücken der Musiker angebrachten Motion Capturing Markern, die normalerweise für lebensechte 3-D-Animationen benutzt werden.

Derzeit überprüfen die Forscher, ob dieser Zusammenhang auch bei anderen Instrumenten und in größeren Gruppen besteht. Deshalb tönen zurzeit häufig helle metallische Rhythmen aus dem Laborraum. Auf dem Boden sitzen dann Leipziger Musikstudenten im Halbkreis und spielen Gamelan – eine Musik, die vor allem auf Java, Bali und in Indonesien verbreitet ist und bei der auf kleinen Gongs und topfartigen Trommeln aus Bronze gespielt wird.

Wie bei den Pianisten nutzen die Forscher auch hier das Motion-Capturing-Verfahren, um später im Computer feinste Bewegungsnuancen auswerten zu können. „Dabei sieht man auch Details, die einem sonst entgehen würden – etwa, wer sich an wem ausrichtet, wer beim Spielen eher die anderen führt und wer sich unterordnet“, sagt Keller. Es sei interessant, dass sich oft solche Verhältnisse einstellen. Was genau auf kognitiver Ebene dahinter stecke, könne er bis jetzt nur vermuten.

Das ist eine von vielen Fragen über die soziale Seite unseres Gehirns, die bald in Angriff genommen werden sollen. Unter anderem untersuchen die Forscher am Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften, unter welchen Bedingungen Korepräsentation stattfindet und ob diese stärker ausfällt, wenn man die andere Person kennt. Dabei wollen die Wissenschaftler auch aufklären, ab welchem Zeitpunkt in der frühkindlichen Entwicklung die Vorstellungen vom Handeln anderer Personen auftreten.

INDUSTRIEROBOTER MIT MENSCHENKENNTNIS

Diese Arbeiten zählen zwar zur Grundlagenforschung. Doch wenn die Mechanismen des Gemeinsamen immer besser verstanden werden, wäre das auch für viele praktische Felder interessant. Etwa für die kognitive Robotik – hier arbeiten Forscher seit einiger Zeit daran, künstliche soziale Intelligenz zu programmieren, um irgendwann einmal Industrierobotern Soft Skills und Menschenkenntnis zu verleihen. Auch die Musik- und die Bewegungspädagogik würden profitieren. Und schließlich könnten die neuen Erkenntnisse ein besseres Verständnis ermöglichen für Störungen des Einfühlungsvermögens, die etwa bei Autismus oder bestimmten Hirnverletzungen auftreten, und damit in Zukunft zu besseren Therapien führen. ◂

GLOSSAR

Common Coding
Die Theorie des Common Coding besagt, dass Wahrnehmen und Handeln teilweise auf denselben kognitiven Vorgängen beruhen. Daraus ergibt sich die Annahme, dass beide aneinander gekoppelt sind und direkt miteinander interagieren können.

Spiegelneuronen
Nervenzellen, die sowohl beim Ausführen einer Handlung aktiv werden als auch dann, wenn eine Handlung nur beobachtet wird. Sie wurden erstmals von den italienischen Neurologen Giacomo Rizzolatti und Vittorio Gallese beschrieben.

Prämotorischer Kortex
Ein Areal der Großhirnrinde, das für Planung von Handlungen zuständig ist.

Elektroenzephalografie (EEG)
Bei einem EEG werden Veränderungen der Hirnaktivität über Elektroden gemessen, die an der Kopfhaut angebracht sind.

Korepräsentation
Die Tatsache, dass Handlungen einer anderen Person beim Zuschauer dieselben Neuronen aktivieren.

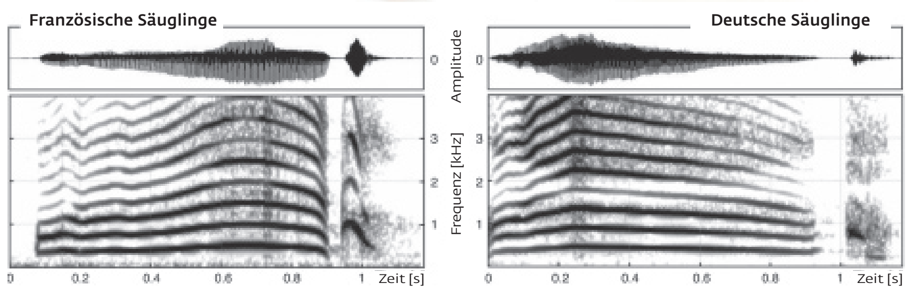
Funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT)
Ein bildgebendes Verfahren, das sichtbar macht, welche Gebiete des Gehirns bei bestimmten Aufgaben und Reizbedingungen aktiv werden.

Schreien mit Akzent

Schon die Laute von Neugeborenen unterscheiden sich je nach Muttersprache



Französische Säuglinge schreien anders als deutsche – und zwar schon in den ersten Tagen ihres Lebens. Das ergab eine Untersuchung von Forschern des Leipziger Max-Planck-Instituts für Kognitions- und Neurowissenschaften, des Zentrums für vorsprachliche Entwicklung und Entwicklungsstörungen am Universitätsklinikum Würzburg sowie des Laboratoire de Sciences Cognitives et Psycholinguistique der Ecole Normale Supérieure in Paris. Dabei verglichen die Wissenschaftler Tonaufnahmen von je 30 französischen und deutschen Babys im Alter zwischen zwei und fünf Tagen. Während die französischen Neugeborenen häufiger ansteigende Schreimelodien produzierten, schrie der deutsche Nachwuchs eher mit fallender Tonhöhe. Der Grund dafür sind vermutlich unterschiedliche Betonungsmuster in den beiden Sprachen, die Kinder bereits im Mutterleib wahrnehmen und später nachahmen. Die evolutionären Wurzeln dieses Verhaltens liegen nach Ansicht der Forscher weit vor der Entstehung der gesprochenen Sprache. Denn die Imitation von Lautmelodien entwickelte sich über Millionen von Jahren und trägt in den frühen Lebenstagen wahrscheinlich zur Mutter-Kind-Bindung bei. (Current Biology, 5. November 2009)

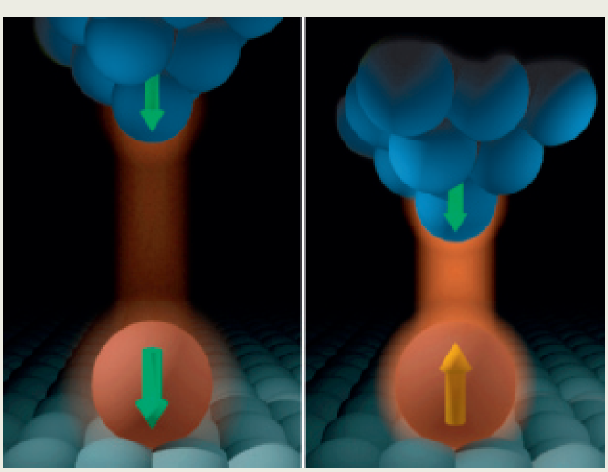


Die Melodie des Plärrens: Französische Babys schreien mit ansteigender Frequenz, sprich Tonhöhe, deutsche mit abfallender.

Fotos: Istockphoto (2); Grafik: MPI für Kognitions- und Neurowissenschaften

Eine Schaltung für atomare Bits

Feiner geht es nicht: Forscher des Max-Planck-Instituts für Mikrostrukturphysik in Halle haben eine Möglichkeit entdeckt, die Magnetisierung einzelner Atome zu manipulieren.



Wie sie anhand von Simulationen feststellten, lassen sich einzelne Atome mit der Spitze eines Rastertunnelmikroskops von „Spin up“ auf „Spin down“ umschalten – einfach indem man den Abstand der Spitze zum Atom ändert. Das magnetische Moment des Spins wirkt wie ein winziger Stabmagnet. Je nachdem, in welche Richtung sein Nordpol weist, kann der Stabmagnet und somit das Atom die „0“ oder „1“ eines Bits speichern. Die Arbeit der Physiker aus Halle könnte daher die Spintronik voranbringen. Diese Technik arbeitet mit den Spins der Elektronen und nicht wie die herkömmliche Elektronik mit ihren Ladungen. Sie soll es ermöglichen, Computer wesentlich kleiner, schneller und energiesparender zu machen. Elektronische Prozesse sind nämlich langsamer als Spin-Prozesse, und die Bits in der Elektronik sind in Zehntausenden von Atomen gespeichert. (Physical Review Letters, 30. Juli 2009)

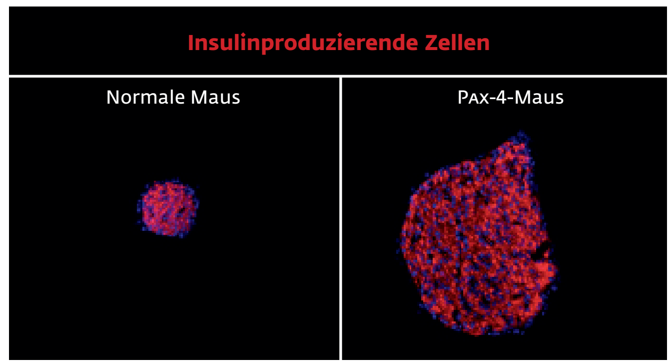
Eine Frage des Abstands: Ist er größer, richtet sich das magnetische Moment im Atom parallel zu jenem in der Spitze eines Rastertunnelmikroskops aus (links). Bei kürzerem Abstand orientiert es sich entgegengesetzt (rechts).

Grafik: MPI für Mikrostrukturphysik

Insulin hört auf ein Signal

Ein einziger Genfaktor regt Zellen der Bauchspeicheldrüse zur Insulin-Produktion an

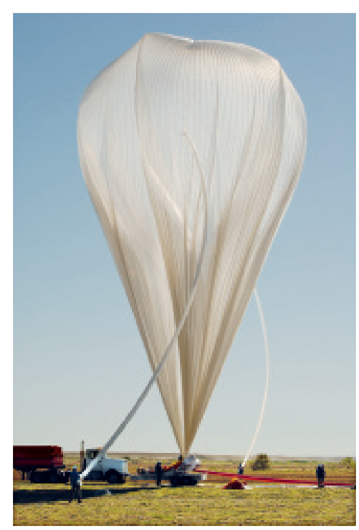
Eine kranke Bauchspeicheldrüse könnte sich in Zukunft auf recht einfache Weise heilen lassen. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für biophysikalische Chemie haben die Insulin-Produktion in Bauchspeicheldrüsen zuckerkranker Mäuse angestoßen, indem sie ein einziges Gen anschalteten. Dieses Gen heißt Pax4. Es startet die Signalkette, die Vorläuferzellen oder Zellen mit anderen Funktionen so umprogrammiert, dass sie Insulin herstellen. Bereits wenige Tage nachdem die Forscher Pax4 aktiviert hatten, bildeten sich in der Bauchspeicheldrüse neue Insulin-produzierende Zellen. Damit dieses Vorgehen auch Diabetes-Patienten helfen kann, müssen die Wissenschaftler jedoch unter anderem einen Schalter finden, um die Umprogrammierung zu beenden. Ohne eine Stopp-Taste würden sich zu viele Insulin-produzierende Zellen in der Bauchspeicheldrüse entwickeln, die dann ihre anderen Aufgaben vernachlässigt.



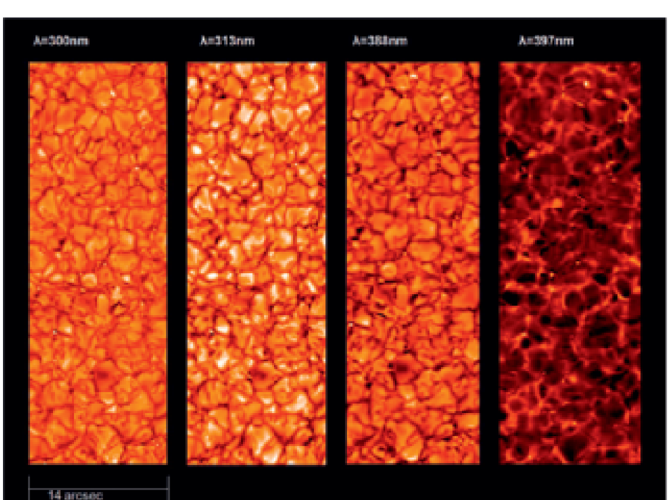
Im Vergleich zu einer normalen Maus (links) steigern Forscher die Zahl der Insulin-produzierenden Zellen in der Bauchspeicheldrüse deutlich, wenn sie in Mäusen das Pax4-Gen aktivieren.

Fotos: MPI für biophysikalische Chemie – Collombat, Mansouri

Näher dran am brodelnden Gasball



Auf der Sonne brodelt es. Gaspakete steigen auf und ab und verleihen der Sonne ihre körnige Oberflächenstruktur, die Granulation. Dunkle Flecken erscheinen und verschwinden wieder, Materiewolken züngeln nach oben – und hinter allem stecken Magnetfelder als Motoren. Das Ballonteleskop *SUNRISE*, ein Gemeinschaftsprojekt des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau mit Partnern in Deutschland, Spanien und den USA, hat nun Bilder geliefert, die das komplexe Wechselspiel auf der sichtbaren Sonnenoberfläche mit bisher unerreichter Detailauflösung zeigen. Die Forscher ließen das sechs Tonnen schwere Teleskop *SUNRISE* an einem Heliumballon 37 Kilometer hoch steigen. Dort sammelt es neben Daten zum Magnetfeld auch das ultraviolette Licht der Sonne ein, das weiter unten von der Atmosphäre absorbiert wird. Mit Hilfe der Aufnahmen wollen die Forscher Details der Sonnenaktivität, vor allem zum Zusammenhang zwischen Helligkeit und Magnetfeldstärke, aufklären.



Körnige Sonne: Die Aufnahmen zeigen deren Granulation in vier verschiedenen Farben im ultravioletten Licht. Der Auschnitt deckt 1/20000 der gesamten Oberfläche ab. Die hellen Strukturen bilden die Grundbausteine der Magnetfelder.

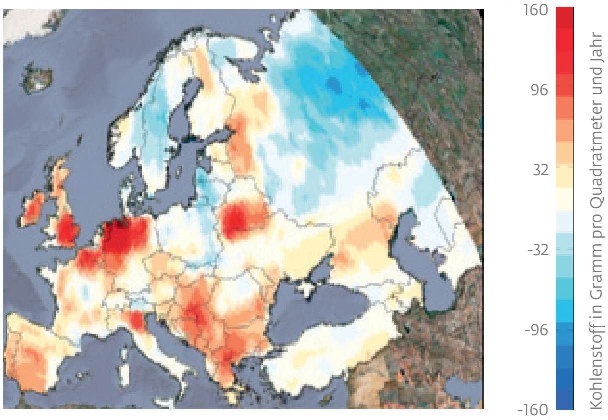
Fotos: MPI für Sonnensystemforschung (links), MPI für Sonnensystemforschung – S.Solanki (rechts)

Europas Landschaften schaden dem Klima

Stickoxide und Methan aus der Landwirtschaft verschlechtern die europäische Klimabilanz drastisch

Über Europa steigen mehr Treibhausgase auf als bislang gedacht. Zum Kohlendioxid aus Industrie und Verkehr kommen noch Methan und Stickoxide dazu. Eine europäische Forschergruppe um Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Biogeochemie in Jena hat jetzt erstmals eine Bilanz aufgestellt, die auch diese starken Treibhausgase berücksichtigt. Sie entstehen vor allem bei der Viehzucht und beim intensiven Ackerbau und wirken sich äußerst negativ auf die europäische Klimabilanz aus. Bislang galten Europas terrestrische Ökosysteme wie Wälder, Grasland und Moore insgesamt als Treibhausgasspeicher.

Zu Unrecht, wie das Forscherteam festgestellt hat. Zwar nehmen vor allem die Wälder 19 Prozent des freigesetzten Kohlendioxids auf. Bei der Bewirtschaftung anderer Landschaften entstehen aber so große Mengen klimaschädlicher Gase, dass sie diesen Effekt fast zunichte machen. Und die Landschaften in der EU alleine, ohne die Wälder in östlichen Ländern wie Russland, belasten die Atmosphäre unterm Strich sogar. (NATURE GEOSCIENCE, 22. November 2009)



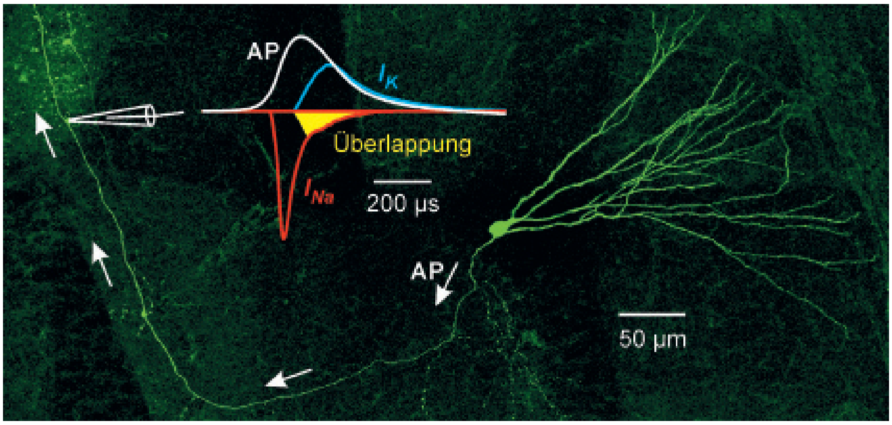
Treibhausgasbilanz nach Region in CO_2-Äquivalenten

Schlechte Bilanz: Werden Methan und Stickoxide als Kohlendioxid-Äquivalente berücksichtigt, setzen die Landschaften Mitteleuropas unterm Strich Treibhausgase frei (rot) und nivellieren den Speichereffekt vor allem russischer Wälder (blau).

Grafik: CarboEuropeTeam

Energiesparen beginnt im Kopf

Die Gehirne von Säugetieren arbeiten ausgesprochen effizient. Ihre Nervenzellen brauchen dreimal weniger Energie, um Signale weiterzuleiten, als die Nervenzellen eines Tintenfischs. Das haben Neurobiologen des Max-Planck-Instituts für Hirnforschung in Frankfurt und der Universität London herausgefunden. Durch das Axon, den langen faserartigen Fortsatz einer Nervenzelle, werden Signale mit Hilfe eines Aktionspotenzials übertragen, das an dem Axon entlangläuft. Dabei ändert sich kurzzeitig die Spannung zwischen dem Inneren und Äußeren der Zelle. Durch entsprechend spezialisierte Kanäle strömen Natriumionen in die Zelle und erhöhen das Membranpotenzial von minus 70 auf plus 30 Millivolt. Die Kaliumionen fließen aus der Zelle heraus, um den Natriumfluss zu kompensieren. Wie die Wissenschaftler jetzt festgestellt haben, spielen die Ionenströme bei Säugern besonders energiesparend zusammen: Der Natriumeinstrom und der ihm entgegenwirkende Kaliumausstrom überlappen zeitlich kaum: Die Natriumkanäle schließen, bevor die Kaliumkanäle öffnen. Daher wandern bei Säugern wesentlich weniger Natriumionen in die Zelle, um das Aktionspotenzial aufzubauen, als bei wirbellosen Tieren wie dem Tintenfisch. Die Zelle muss sie daher auch nicht energieaufwendig wieder zurückpumpen, um für das nächste Aktionspotenzial bereit zu sein. (SCIENCE, 11. September 2009)



Sparsames Signal: Ein Aktionspotential (AP – weiße Kurve) läuft an einem Axon einer Nervenzelle aus einem Rattengehirn entlang. Es entsteht, weil Natriumionen in die Zelle strömen (INa – rote Kurve) und Kaliumionen (IK – blaue Kurve) aus ihr heraus. Je kleiner die Überlappung der Ionenflüsse (gelbe Fläche), desto weniger Energie braucht das Signal.

Grafik: H. Alle, J.R.P. Geiger

Das Alter treibt Blüten

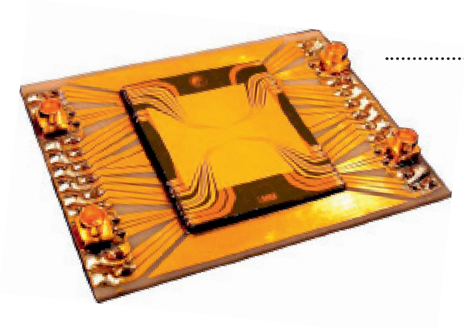
Pflanzen erblühen auch an kurzen, dunklen Tagen

Schon in einem Monat wird es wieder so weit sein – höhere Temperaturen und längeres Tageslicht erwecken die ersten Frühlingsblumen zum Leben. Doch auch ohne diese Signale von außen wissen Pflanzen, wann es Zeit zum Blühen ist. Max-Planck-Wissenschaftler vom Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen haben einen neuen Signalweg in den Sprosszellen der Ackerschmalwand entdeckt, der die Pflanzen auch dann erblühen lässt, wenn die äußeren Bedingungen ungünstig sind. Das Molekül micro-RNA156 verhindert, dass für die Blütenbildung wichtige Gene in Proteine übersetzt werden, und blockiert so die Ausbildung von Blüten. Den Tübinger Entwicklungsbiologen zufolge nimmt jedoch die Konzentration von micro-RNA156 mit der Zeit ab. Dadurch können die Blütengene schließlich das Blütenwachstum auch unabhängig von äußeren Faktoren anregen. So ist sichergestellt, dass die Pflanzen nicht endlos auf den idealen Zeitpunkt zum Blühen warten und den Zeitpunkt zur Fortpflanzung verpassen. (CELL, 21. August 2009)



Rastermikroskopische Aufnahme einer Blüte der Ackerschmalwand, *Arabidopsis thaliana*.

Foto: MPI für Entwicklungsbiologie – Jürgen Berger



Kompakt und präzise: Atom-Interferometer auf solchen Mikrochips eignen sich für die Messung von Rotationsbewegungen oder des Gravitationsfeldes der Erde.

Messen mit Atom-Wölkchen

Etwas Gutes noch besser zu machen – das ist Wissenschaftlern am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und der LMU München gelungen. Sie haben Atome auf einem speziellen Mikrochip, einem sogenannten Atomchip, mit Mikrowellenfeldern manipuliert und so ein Atom-Interferometer konstruiert. Ein Atom-Interferometer ist ein sehr empfindliches Messgerät, das die quantenmechanischen Welleneigenschaften der Atome ausnutzt: Zwei Atom-Wölkchen werden überlagert – ganz so wie die Lichtwellen in einem herkömmlichen Interferometer. Dabei erzeugen sie ein Interferenzmuster. Dieses Muster hängt von den äußeren Kräften ab, die auf die Atomwölkchen wirken. Auf diese Weise kann das Atom-Interferometer Rotationsbewegungen etwa im Flugzeug äußerst präzise erfassen oder das Gravitationsfeld der Erde messen und so möglicherweise bei der Suche nach Rohstoffen helfen. Auf Atomchips wird es nun vielseitig einsetzbar, da diese robust und kompakt sind. (NATURE PHYSICS, August 2009)

Foto: Philipp Treutlein – LMU München

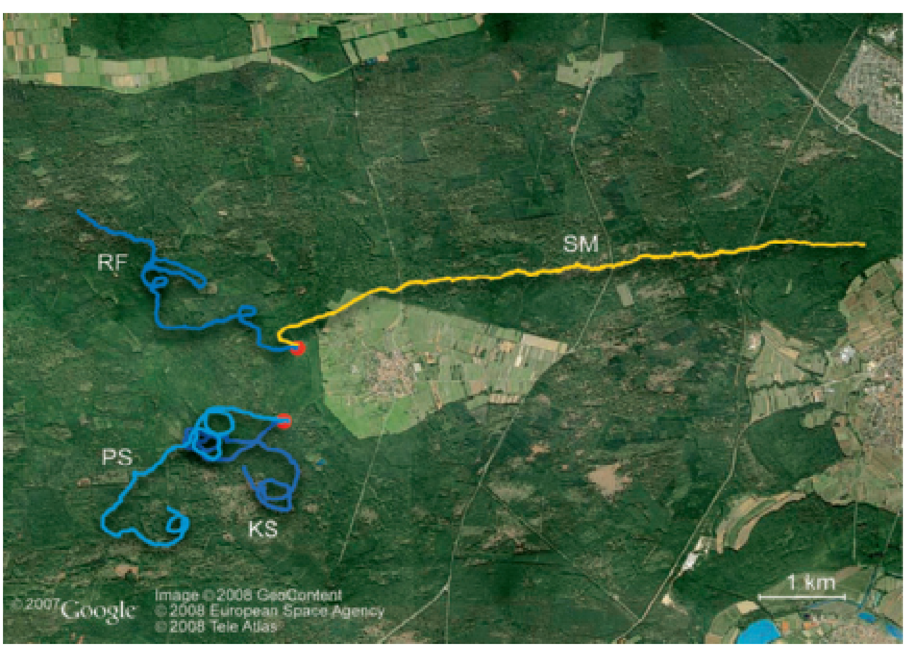
Schlecht informiert zur Krebsvorsorge

Der Nutzen von Krebsvorsorge wird in Deutschland überschätzt. Wie eine europaweite Studie des Harding Zentrums für Risikokompetenz und der Gesellschaft für Konsumforschung ergeben hat, kennen die meisten Bürger hier den tatsächlichen Nutzen und das Risiko der Krebsfrüherkennung nicht. Ärzte und Gesundheitsverbände empfehlen regelmäßige Vorsorgeuntersuchungen, um Krebserkrankungen bereits im Frühstadium entdecken und behandeln zu können. Doch rund 90 Prozent der in Deutschland Befragten schätzen den Nutzen einer Mammografie und eines PSA-Tests zur Brust- beziehungsweise Prostatakrebs-Vorsorge zu hoch ein. Im europäischen Vergleich schneiden sie damit äußerst schlecht ab. Ein möglicher Grund dafür könnten missverständliche Aufklärungsbroschüren sein. In der Studie zeigte sich nämlich, dass 40 Prozent der Deutschen regelmäßig solche Quellen zu Rate ziehen – doppelt so viele wie im europäischen Durchschnitt. Gerade diese Menschen neigen jedoch dazu, den Nutzen der Früherkennung zu überschätzen. Darüber hinaus vermitteln offenbar Ärzte in Deutschland ihren Patienten statistische Angaben zu Nutzen und Risiko nicht ausreichend. (JOURNAL OF THE NATIONAL CANCER INSTITUTE, 2. September 2009)

Auf der Suche nach Orientierung

Warum wir im Kreis gehen, wenn wir uns verirren

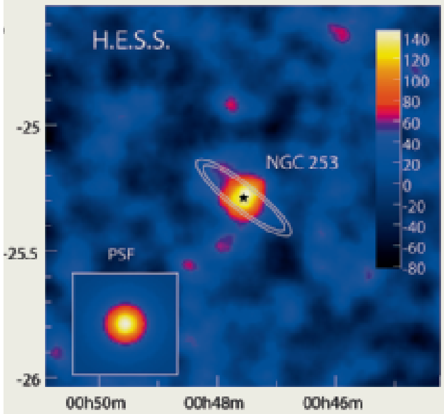
Es ist ein beliebtes Motiv vieler Hollywood-Filme: Verunglückt in der Wüste oder im Dschungel läuft der Filmheld auf der Suche nach Rettung im Kreis und landet wieder an seinem Ausgangspunkt. Dass diese Vorstellung nicht nur der Fantasie der Filmemacher entspringt, haben Forscher vom Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik erstmals im Experiment nachgewiesen. Als Testgelände dienten dabei die Sahara in Tunesien sowie ein ausgedehntes Waldgebiet im Rheinland. Die meisten Versuchspersonen wichen in dieser Umgebung ohne markante Orientierungspunkte unmittelbar nach dem Loslaufen von ihrem geraden Weg ab. „Es ist tatsächlich wie im Film – einige der Probanden haben mehrmals ihren eigenen Pfad gekreuzt, ohne es zu merken“, sagt Jan Souman vom MPI in Tübingen. Nur bei wolkenlosem Himmel gelang es den Probanden geradeaus zu gehen, indem sie sich am Sonnenstand orientierten. Verblüfft hat den Wissenschaftler auch, wie hilflos der Mensch offenbar ohne äußere Orientierungshilfen ist: Im Schnitt entfernt sich ein Mensch mit verbundenen Augen nicht weiter als 100 Meter von seinem Ausgangspunkt. Offenbar sind ungenaue Richtungsinformationen aus den Augen, Ohren und Gleichgewichtsorganen die Ursache dafür, dass kaum jemand mehr als 20 Meter geradeaus gehen kann – und nicht unterschiedlich lange oder kräftige Beine, wie vielfach angenommen. (CURRENT BIOLOGY, 20. August 2009)



Orientierungsexperiment im Rheinland: Die roten Punkte markieren die Startpunkte der Probanden, die farbigen Linien ihre Wege. Während sich die Probanden PS, KS und RF nicht am Sonnenstand orientieren konnten, schien bei SM kurz nach Beginn des Versuchs die Sonne.

Grafik: Jan Souman, Google Earth

Porträt eines kühlen Planeten



Grafik: H.E.S.S.-Kollaboration

Im Licht seiner Sonne gesehen: Ein Bild von GJ 758 B und seiner Umlaufbahn sowie möglicherweise eines weiteren Planten C können sich Astronomen nur dank einer Technik machen, mit der sie das Licht des Zentralsterns GJ 758 unterdrücken.
Zum Vergleich: die Entfernungen zwischen einigen Planeten und unserer Sonne.

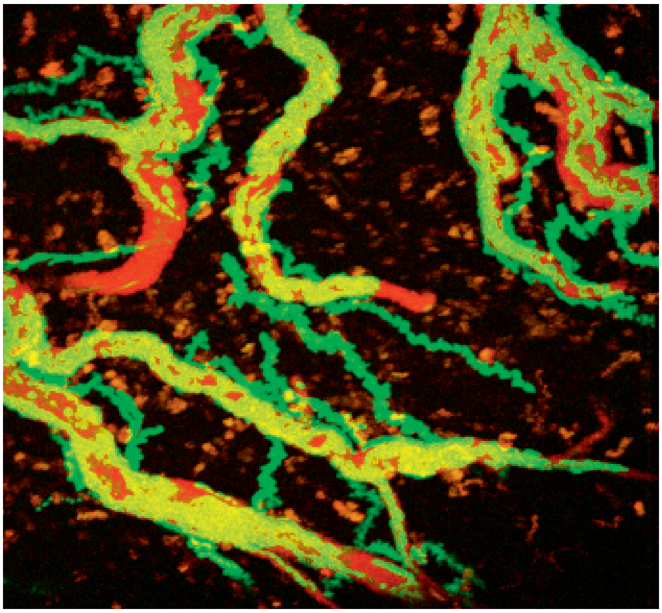
Volltreffer bei der Planetenjagd: Forscher aus dem Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg haben einen lichtschwachen Himmelskörper entdeckt und direkt abgebildet, der den Stern GJ 758 umläuft. Die geschätzte Masse liegt zwischen 10 und 40 Jupitermassen. Demnach handelt es sich bei dem Fund entweder um einen Riesenplaneten oder um einen braunen Zwerg, eine verhinderte Sonne. Eines ist sicher: Mit einer Temperatur von etwa 330 Grad Celsius ist GJ 758 B der kälteste jemals direkt abgebildete Begleiter eines sonnenähnlichen Sterns. Und er wird sich wahrscheinlich noch weiter abkühlen. Denn GJ 758 B kreist in mindestens ebenso großer Entfernung um seinen Zentralstern wie Neptun, der äußerste Vertreter unseres Planetensystems, um die Sonne. Seine Oberfläche müsste also auch ähnlich kalt sein, nämlich rund minus 200 Grad Celsius. Daher vermuten die Heidelberger Astronomen, dass der neu entdeckte Planet noch jung ist und seine Temperatur weiter sinken wird. (arXiv.org/abs/0911.1127)

Erwischt beim Grenzübertritt

Live-Beobachtungen enthüllen, wie Immunzellen bei der Multiplen Sklerose ins Gehirn eindringen

In flagranti haben Forscher des Max-Planck-Instituts für Neurobiologie in Martinsried Immunzellen ertappt, als diese ins Hirngewebe eindrangen. Gewöhnlich verwehrt die Blut-Hirn-Schranke den körpereigenen Abwehrzellen den Zutritt ins Zentrale Nervensystem. Bei manchen Krankheiten wie der Multiplen Sklerose setzen sich aggressive Immunzellen aber darüber hinweg – sie dringen durch die speziellen Blutgefäßwände, die das Gehirn abschirmen sollen. Das verfolgten die Wissenschaftler nun im Detail und helfen so bei der Suche nach Therapieansätzen, mit denen sich Krankheiten wie die Multiple Sklerose behandeln lassen. Die Forscher markierten T-Zellen, eine Spezialeinheit des Immunsystems, mit grün fluoreszierendem Protein und haben die Zellen unter einem Lichtmikroskop beobachtet: Erst heften sich die Immunzellen vermehrt an die Blutgefäßwände, dann beginnen sie sogar gegen den Blutstrom an ihnen entlangzukriechen, so als suchten sie ein Schlupfloch – ein Verhalten, das von T-Zellen bislang nicht bekannt war. Nach einigen Minuten bis Stunden zwängen sich einige der Immunzellen durch die Gefäßwand. Hinter der Blut-Hirn-Schranke setzen die Eindringlinge ihre Suche fort, bis sie auf Fresszellen, die Müllabfuhr des Immunsystems, stoßen. Im Kontakt mit diesen schütten sie entzündungsfördernde Botenstoffe aus, was weitere T-Zellen anlockt und den Angriff auf das Nervensystem einleitet.

Foto: MPI für Neurobiologie – Bartholomäus



Spuren einer Invasion: T-Zellen (grün) kriechen an den Wänden von Blutgefäßen (rot) entlang. Das Bild zeigt die Wege, die sie in 20 Minuten zurückgelegt haben. Einige ziehen ihre grüne Bahn auch bereits durch das umgebende Hirngewebe.

Zwei Gene, kaum Schuppen

Der Spiegelkarpfen macht Köchen die Arbeit leicht – zumindest seit Mönche ihm im Mittelalter die Schuppen fast weggezüchtet haben. Dabei besitzt er seither sogar zwei Kopien des Gens, das ihm vor dem Eingreifen der Mönche sein Schuppenkleid verschaffte. Das haben Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen jetzt enthüllt. Eine der beiden Kopien ist allerdings mutiert und kann deshalb nicht mehr zur Schuppenbildung beitragen. Wenn der Fisch nicht auf ein Reserve-Gen zurückgreifen könnte, wäre er damit nicht lebensfähig. Denn das Gen sorgt nicht nur für die Bildung der Schuppen: Auf ihm liegt der Bauplan für einen Rezeptor, ohne den sich der Fisch-Embryo nicht entwickeln kann. Aus bislang nicht genau geklärten Gründen wird diese Kopie abgeschaltet, sobald das Gen seine lebenswichtigen Aufgaben erfüllt hat und bevor die Schuppen wachsen. Offenbar veränderte sich bei der Gen-Verdopplung auch deren Regulation. Reserve-Gene spielen also eine Rolle, wenn Organismen neue Eigenschaften entwickeln. Sie übernehmen die alten Funktionen eines Gens, während eine mutierte Kopie neue Eigenschaften hervorbringt. (Current Biology, 13. Oktober 2009)

Foto: MPI für Entwicklungsbiologie – Miklós Bercsényi



Lecker und fast schuppenfrei: Sein spärliches Schuppenkleid verdankt der Spiegelkarpfen einer Genverdopplung.

Der Himmel auf Erden

Den Himmel ins Labor holen, das geht schwer. Im Labor den Himmel aufbauen, das ist schon einfacher. Forscher um **Andreas Wolf** tun genau das. Am Heidelberger **Max-Planck-Institut für Kernphysik** stellen sie chemische Reaktionen nach, die sich in weit entfernten interstellaren Wolken abspielen.

TEXT **THOMAS BÜHRKE**

Seit rund 20 Jahren läuft am Max-Planck-Institut für Kernphysik der Testspeicherring TSR: eine Art Rennbahn mit 55 Meter Umfang, auf der geladene Teilchen von Magneten geführt herumrasen. Verglichen mit seinen großen Brüdern, etwa dem neuen Superbeschleuniger LHC am europäischen Teilchenlabor in Genf, nimmt sich der TSR bescheiden aus. Dennoch gehört er beileibe nicht zum alten Eisen – ganz im Gegenteil. Mit geschickter Technik ausgestattet liefert die Anlage nach wie vor exzellente Messdaten.

So haben Heidelberger Physiker am Testspeicherring vor wenigen Jahren Einsteins Relativitätstheorie mit unerreichter Präzision geprüft (MAXPLANCKFORSCHUNG 1/2004, Seite 20 ff.). Und seit einer Reihe von Jahren dient der TSR der Arbeitsgruppe von Andreas Wolf auch einem ganz anderen Ziel: dem Studium chemischer und physikalischer Reaktionen, die im Weltraum zur Entstehung von Molekülen führen.

Die produktivsten Chemieküchen im All sind riesige Wolken aus Gas und Staub. Auf Fotos machen sie einen sehr dichten Eindruck: Sie scheinen undurchdringlich und verschlucken das Licht hinter ihnen stehender Sterne. Dennoch sind die Dichten mit durchschnittlich 10 000 Teilchen pro Kubikzentimeter viel geringer als in einem Reinstraumlabor auf der Erde. Es ist die enorme Ausdehnung der Wolken von mehreren Lichtjahren, die sie für Licht opak macht.

MOLEKÜLE ALS GEBURTSHELFER DER STERNE

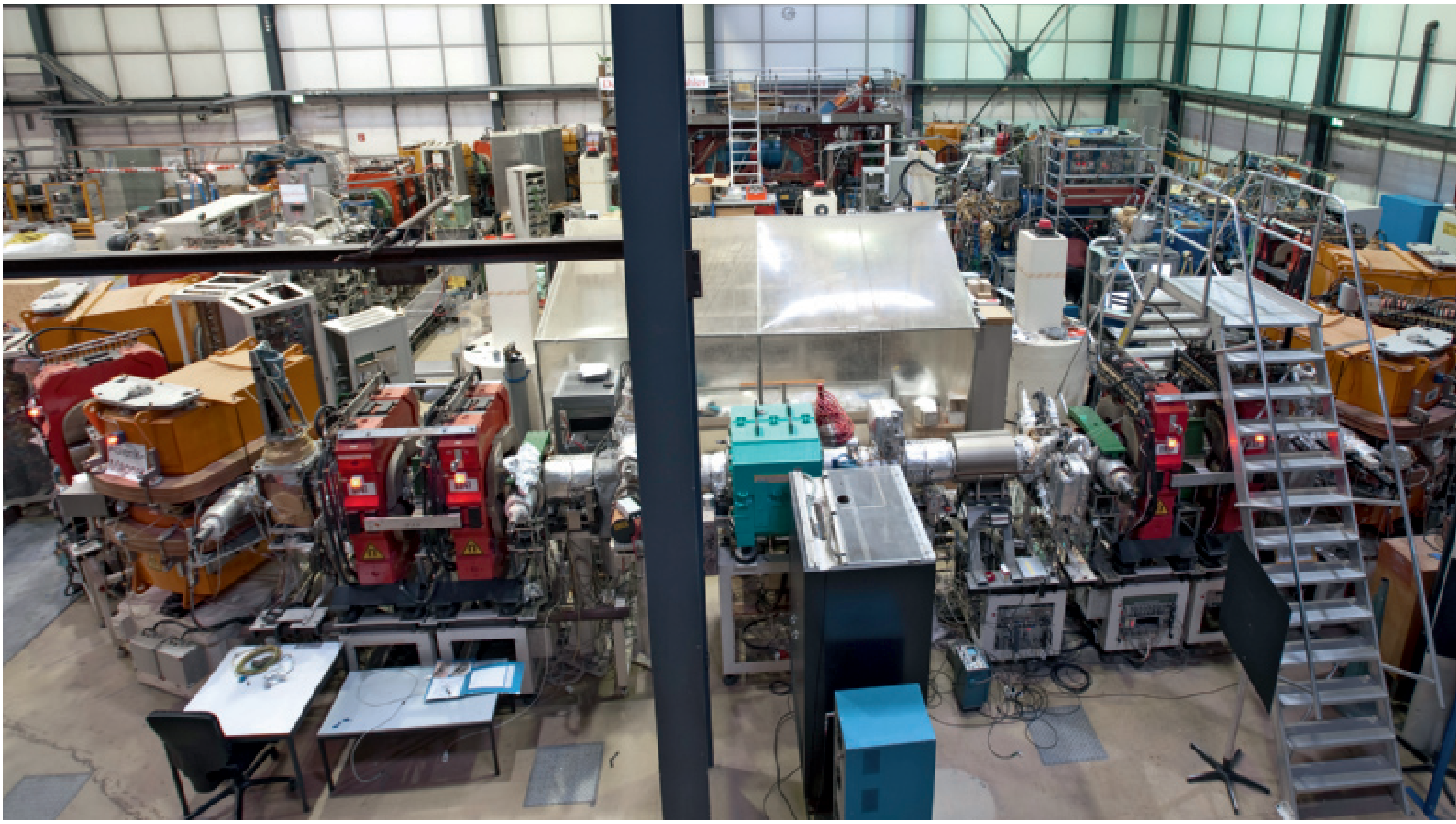
Diese Gas- und Staubwolken sind die Geburtsstätten von Sternen und die Produktionsfabriken von Molekülen. In den vergangenen Jahrzehnten haben Astronomen dort eine Reihe von Molekülen entdeckt. Rund 150 Spezies kennen sie heute, angefangen von einfachen Verbindungen wie dem Hydroxylradikal (OH), Wasser (H_2O) und Kohlenmonoxid (CO) bis hin zu komplexen organischen Stoffen wie dem Zucker Glykolaldehyd (CH_2OHCHO) oder Ethylenglykol ($HOCH_2CH_2OH$). Die Suche nach Glycin, die einfachste Aminosäure und eine der Grundbausteine der DNA, läuft weltweit auf Hochtouren.

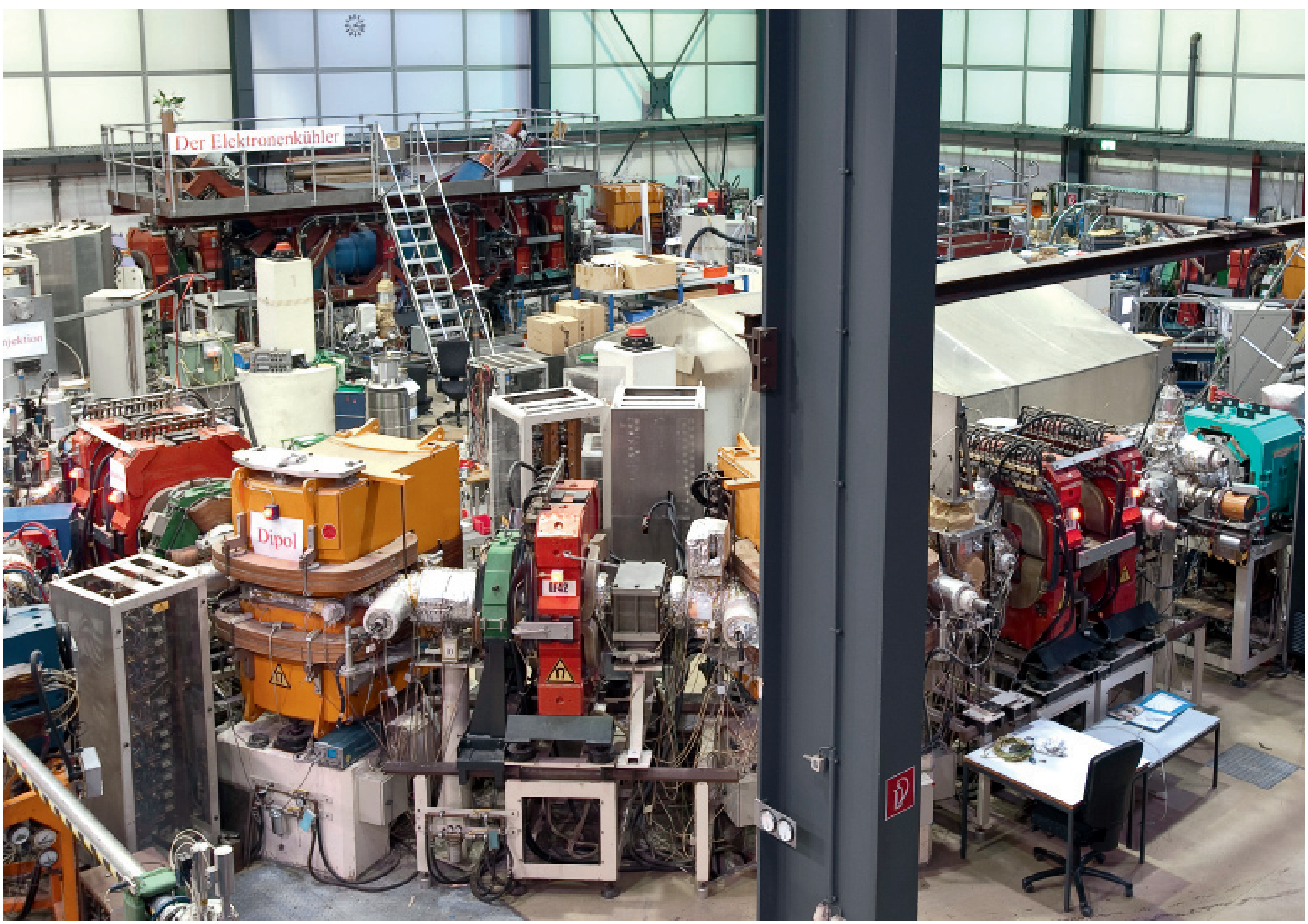
Die interstellaren Moleküle greifen auf unterschiedliche Weise in das kosmische Geschehen ein. So wird etwa bei der Entstehung vieler Moleküle Energie in Form von Strahlung frei und ins All abgeführt. Dadurch kühlt sich die Wolke ab und zieht sich weiter zusammen. Dieser Vorgang ist nötig, damit sich die Materie letztlich bis zu Sternen zusammenballen kann. Nicht zuletzt stellt sich auch die Frage, ob die organischen Moleküle ursächlich etwas mit der Entstehung des Lebens auf der Erde zu tun hatten.

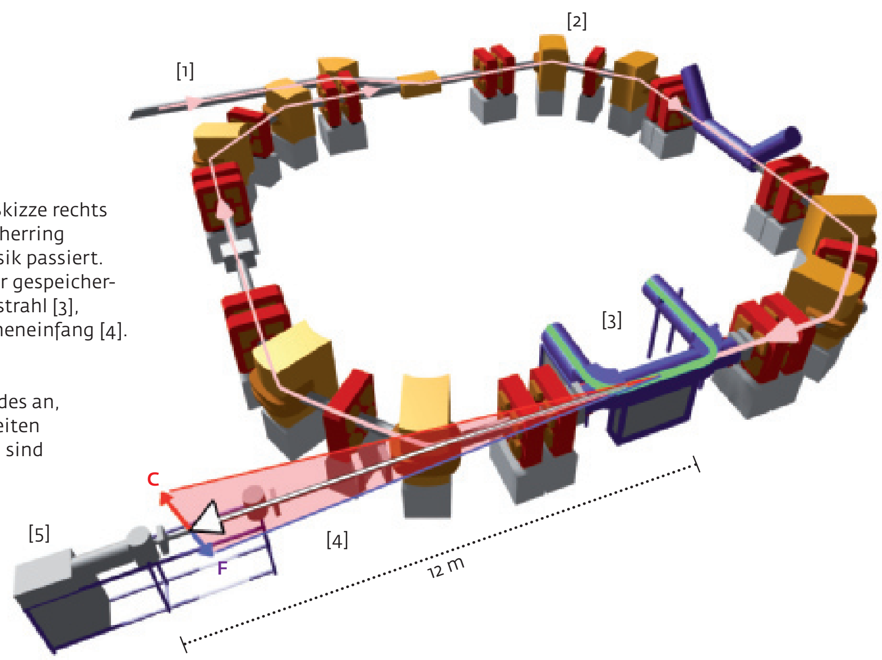
Moleküle können im Weltall auf zwei Wegen entstehen: Zum einen setzen sich Atome und Moleküle auf Staubteilchen ab und reagieren dort mit



Blick in einen Kreißsaal der Sterne: In kalten interstellaren Wolken – im Bild der Adlernebel – existiert ein verzweigtes chemisches Reaktionsnetz. Forscher versuchen es im irdischen Labor zu entschlüsseln.




Der Elektronenkühler
Dipol
njektion



rechts: Molekülaufbruch beim Elektroneneinfang: Die Skizze rechts zeigt an unterschiedlichen Stationen, was im Testspeicherring TSR des Heidelberger Max-Planck-Instituts für Kernphysik passiert. Injektion von CF+ Ionen [1], magnetische Abbiegung der gespeicherten Ionen [2], Überlagerung mit dem kalten Elektronenstrahl [3], dissoziierende neutrale Bruchstücke nach dem Elektroneneinfang [4]. Am Ende steht der abbildende Detektor [5].

links: Wie eine Fabrikhalle mutet das Innere des Gebäudes an, das den Testspeicherring beherbergt. Für Wartungsarbeiten oder die Installation von Experimenten und Detektoren sind alle Teile frei zugänglich. Im unteren Bild erkennt man hinten den Elektronenkühler.

anderen Atomen. Zum anderen stoßen diese Teilchen im freien Raum zusammen und lagern sich aneinander. „Diese Reaktionen in der Gasphase untersuchen wir mit dem Speicherring“, sagt Andreas Wolf.

Auf den ersten Blick scheint die Idee paradox. In den Molekülwolken herrschen Temperaturen um zehn Kelvin (minus 263 Grad Celsius), sodass sich die Atome und Moleküle dort sehr langsam bewegen. Im TSR kreisen die Teilchen jedoch mit rund 20 000 Kilometer pro Sekunde, entsprechend rund sieben Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Deswegen bedarf es eines Tricks, um bestimmte interstellare Reaktionen im TSR nachzustellen.

In den Speicherring gelangen positiv geladene Ionen, also Atome oder Moleküle, die aus ihrer Hülle ein Elektron verloren haben. In einem Teilstück des Speicherrings befindet sich ein sogenannter Elektronenkühler. Hier werden von außen Elektronen mit einer ganz bestimmten Geschwindigkeit eingespeist. Sie begleiten den Ionenstrahl über knapp zwei Meter hinweg und werden dann wieder aus der Rennbahn herausgelenkt. In diesem Elektronenbad stoßen die Teilchen zusammen und beeinflussen sich durch ihre elektrischen Kräfte.

Als Folge hiervon werden Ionen, die schneller sind als die Elektronen, abgebremst und langsamere beschleunigt. Dadurch nähern sich die Geschwindigkeiten aller Teilchen einander an. Das geschieht bei jedem Umlauf, also mehrere hunderttausend Mal pro Sekunde, bis schließlich alle Elektronen und Ionen fast gleich schnell sind.

EIN KALTER STRAHL AUS HUNDERT MILLIONEN IONEN

Setzt man sich in Gedanken auf eines der Ionen, so scheinen sich die umgebenden Elektronen kaum zu bewegen. Dasselbe Phänomen erlebt man auf der Autobahn, wenn zwei Fahrzeuge mit nahezu derselben Geschwindigkeit nebeneinander herfahren. Diese fast verschwindende Relativgeschwindigkeit bedeutet aus physikalischer Sicht, dass Ionen und Elektronen gemeinsam ein erstaunlich kühles Gas bilden – genauso wie in einer interstellaren Wolke nahe am absoluten Nullpunkt der Temperatur bei minus 273,15 Grad Celsius (0 Kelvin). Physiker sprechen deswegen auch von einem kalten Strahl, der im TSR bis zu hundert Millionen Ionen enthalten kann.

Doch damit nicht genug. Im TSR können Ionen und Elektronen nicht nur auf dieselbe Geschwindigkeit gebracht werden, sondern auch mit fast beliebiger Geschwindigkeit aneinander vorbeifliegen. „Damit simulieren wir unterschiedliche Temperaturen, bei denen die Reaktionen stattfinden“, erklärt Wolf. Dem liegt die physikalische Vorstellung zugrunde, dass sich Atome und Moleküle mit wachsender Temperatur immer schneller bewegen.

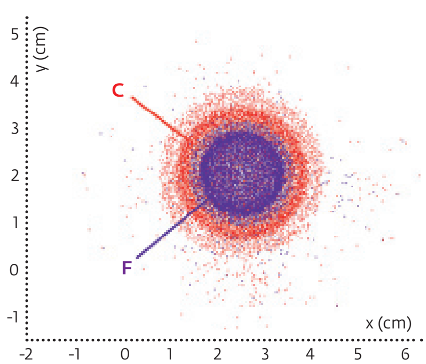
Die Elektronen haben jedoch nicht nur die Aufgabe, den Ionenstrahl zu kühlen, sondern sie sind gleichzeitig deren Reaktionspartner. Wolf und Kollegen stellen mit dem TSR also nicht beliebige Reaktionen nach, sondern ausschließlich Elektronenanlagerungen. Doch die spielen im Netz der interstellaren Chemie eine bedeutende Rolle. Eine zentrale Position nimmt hier das Ion H_3^+ ein. Es kann einerseits ein Sauerstoffatom anlagern und dann in weiteren Schritten ein Wassermolekül bilden. Lagert es statt des Sauerstoff- ein Kohlenstoffatom an, so können daraus komplexe organische Moleküle werden. „Das H_3^+-Ion steht an einer zentralen Verzweigung des Reaktionsbaums“, sagt Andreas Wolf.

Theoretiker hatten sich lange gefragt, was passiert, wenn ein H_3^+-Ion ein negativ geladenes Elektron anlagert. In einer naiven Sicht würde man vermuten, dass sich die beiden Teilchen zu einem neutralen H_3-Molekül vereinigen, weil sich entgegengesetzte Ladungen anziehen. Doch so einfach ist es nicht. Ob sich ein Elektron anlagern kann oder nicht, hängt davon ab, ob die Elektronen beim Anlagerungsprozess einen passenden Zustand einnehmen können. >

Fotos: Andreas Varnhorn (2, links), Grafik: MPI für Kernphysik (oben)

1 | Mit einem Umfang von 35 Metern ist der Cryogenic Electrostatic Storage Ring kompakter als sein Vorgänger. Die ersten Komponenten – im Bild ein Teil der Außenhülle – werden bereits montiert. Im Jahr 2012 soll der neue Speicherring in Betrieb gehen.

2 | Feintuning am Detektor: Michael Lestinsky von der Columbia University, New York, reguliert die Zählelektronik für einzelne Ionen.



Summiertes Bild der Auftreff-Orte von C- und F-Atomen in vielen tausend einzeln nachgewiesenen Molekülaufbruch-Prozessen. Die Größe der Ringe zeigt die beim Aufbruch freigesetzte Bewegungsenergie der Fragmente.

Theoretiker kamen nach Berechnungen der Elektronenenergien zu dem Ergebnis, dass sich für kalte Elektronen an H_3^+ ein solches „Einfallstor" nicht auftut und der Anlagerungsprozess im Weltraum daher extrem selten stattfinden sollte. „Astrophysiker standen dieser Aussage aufgrund ihrer Beobachtungen schon lange skeptisch gegenüber", sagt Wolf. Deshalb beschlossen die Heidelberger Max-Planck-Forscher, diese Reaktion im TSR zu untersuchen.

ENERGIE LÄSST MOLEKÜLE ROTIEREN WIE KREISEL

Das Experiment erforderte es, ein extrem kaltes H_3^+-Gas herzustellen. Diese Aufgabe übernahm Wolfs Mitarbeiter Holger Kreckel. Er baute ein Gerät, das es erlaubte, die Ionen in einem elektromagnetischen Feld einzufangen. Dann wurden sie mit Helium auf Weltraumtemperaturen gekühlt und erst dann in den TSR geleitet. Das Ergebnis ließ keinen Zweifel: Die Experimente ergaben viel höhere Anlagerungsraten als vorhergesagt. Was hatten die Theoretiker vergessen?

Üblicherweise betrachtet man bei chemischen Reaktionen nur die Elektronenschale eines Atoms oder Moleküls. Doch in Wirklichkeit geschieht noch mehr: Wenn ein von außen kommendes Elektron in die Elektronenhülle eines positiven Ions eindringt, so nimmt es Bewegungsenergie auf. Diese muss es abgeben, wenn es in dem Molekül verbleiben will. Die Experimente lassen nur die Erklärung zu, dass ein Teil dieser Energie die im Molekül sitzenden Atomkerne in Bewegung setzt und dieses wie einen Kreisel zum Rotieren bringt. Die Resultate belegen diesen von den Theoretikern nur zögernd in Betracht gezogenen Prozess und seine entscheidende Bedeutung für die Anlagerung kalter Elektronen.

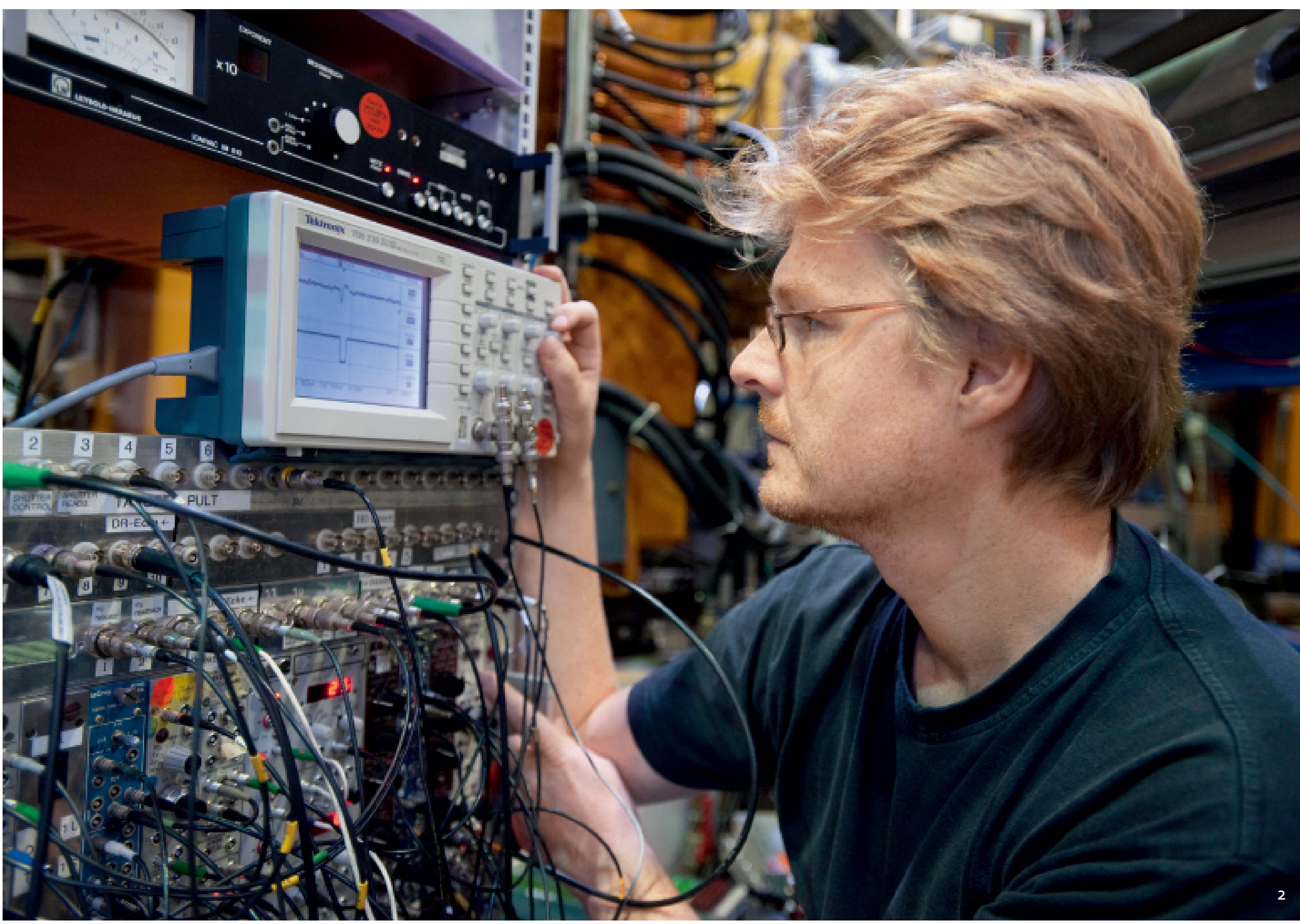
Hier zeigt sich ganz deutlich die zweite Stoßrichtung der Heidelberger Experimente: Nicht nur die Astrophysik profitiert von den Ergebnissen, sondern auch die quantenphysikalische Beschreibung von Atomen und Molekülen. Und diese geht noch weiter. Wie bereits erwähnt, lässt sich am TSR die Geschwindigkeitsdifferenz, mit der Elektronen und Ionen aneinander vorbeifliegen, einstellen. Damit kann man auch festlegen, wie viel Energie die Elektronen auf die Ionen bei der Anlagerung übertragen.

Als Wolf und seine Kollegen nun diese Energie innerhalb eines bestimmten Bereichs variierten, stellten sie fest, dass sich die Anlagerungsrate nicht kontinuierlich veränderte, sondern Maxima und Minima aufwies. Die Erklärung liefert wieder die Quantenphysik: Während ein Brummkreisel mit beliebiger Geschwindigkeit rotieren kann, kann ein Molekül diese nur schrittwei-

Grafik: MPI für Kernphysik (links), Fotos: Andreas Varnhorn (2) (rechts)

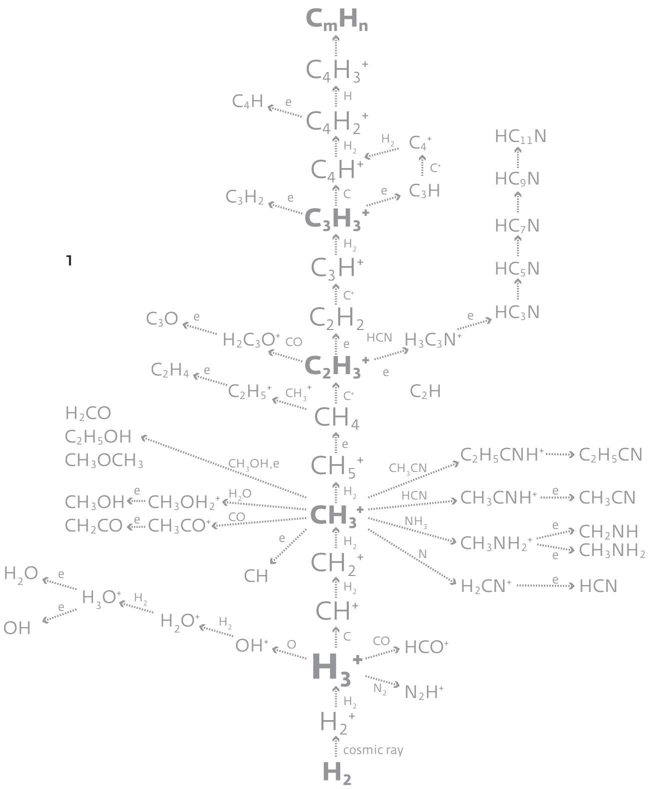


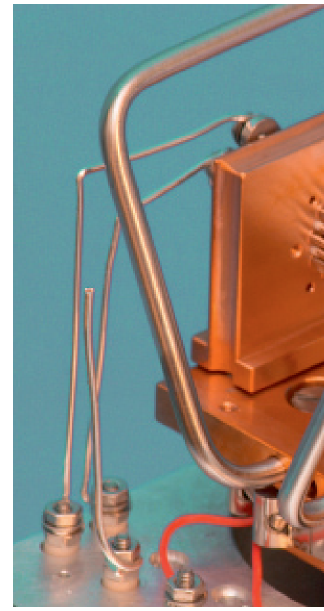
1



2

1





1 Das H_3^+-Ion befindet sich an einer zentralen Stelle des vielfältigen Verzweigungsbaums chemischer Reaktionen. So kann es etwa ein Sauerstoffatom anlagern und dann in weiteren Schritten ein Wassermolekül bilden. Lagert es dagegen ein Kohlenstoffatom an, können daraus komplexe organische Moleküle entstehen.

2 Ein wichtiges Hilfsmittel zur Präparation kalter Moleküle am Testspeicherring des Heidelberger Max-Planck-Instituts für Kernphysik ist die Ionenfalle für kalte H_3^+-Ionen.

3 Andreas Wolf holt mit seinem Team den Himmel ins Labor und untersucht dabei auch quantenphysikalische Effekte.

se – in Quanten – verändern. Immer wenn ein Elektron genau die richtige Anregungsenergie für die Rotation mitbringt, steigt die Anlagerungsrate.

Damit tragen Wolfs Experimente zu einer quantenphysikalisch vollständigen Beschreibung von Molekülen bei. Und diese ist ziemlich schwierig – scheitert sie doch schon an den einfachsten Molekülen wie H_3^+. Diesem messen die Forscher aber eine derart große Bedeutung bei, dass sie in den vergangenen Jahren eigens zu diesem Thema mehrere Tagungen veranstalteten.

WASSERLIEFERANT FÜR DAS KOSMISCHE NETZWERK

Doch die Elektronenanlagerung hat noch eine weitere Folge: Sie zerstört das Molekül. Da das anfliegende Elektron die bei seiner Bindung frei werdende Energie großteils auf die Kerne überträgt, spaltet sich das Molekül, sodass aus dem H_3^+-Ion beispielsweise ein H_2-Molekül und ein H-Atom hervorgehen. Die chemische Beschaffenheit der Produkte lässt sich im TSR sehr gut messen.

Die positiv geladenen H_3^+-Ionen werden von Magnetfeldern im TSR-Strahlrohr auf ihre Bahn gezwungen. Doch Bruchstücke wie H_2 und H sind elektrisch neutral. Sie reagieren deswegen nicht auf das Feld und fliegen aus dem Speicherring heraus. An dieser Stelle hat Wolfs Gruppe im vergangenen Jahr einen Detektor mit der Bezeichnung EMU *(Energy Sensitive Multistrip Detector)* installiert, der Impuls und Masse der eindringenden Teilchen misst. EMU entstand in Zusammenarbeit mit Kollegen des israelischen Weizmann-Instituts in Rehovot.

Mit bis zu tausend „Bildern“ pro Sekunde kann EMU nun Molekülmassen und Impulse aller Produkte für einzelne Aufbruchreaktionen registrieren – eine technische Meisterleistung. Aus diesen Daten lassen sich die Vorgänge beim Anlagern der Elektronen und anschließendem Auseinanderbrechen des Moleküls fast wie bei einem Billard rekonstruieren.

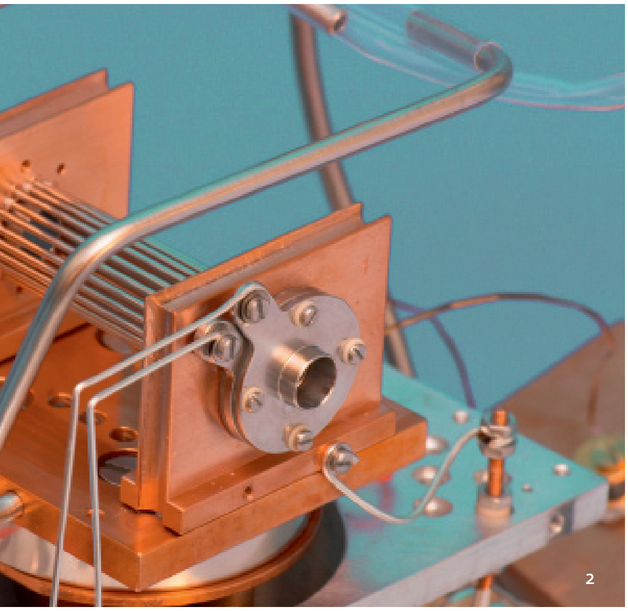
Mit dieser Methode haben Andreas Wolf und seine Kollegen eine ganze Reihe von Anlagerungsreaktionen studiert. Eines der jüngsten Beispiele ist das Hydronium-Ion H_3O^+. Dies ist deswegen besonders interessant, weil es bei Elektronenanlagerung in H_2O und OH zerfallen kann, somit also – bei Temperaturen nahe am absoluten Nullpunkt – einer der Wasserlieferanten im Kosmos ist. Kompliziert wird die Angelegenheit dadurch, dass es auch in andere Fragmente zerbrechen kann, etwa in OH plus zwei H-Atome oder O plus H plus H_2. Diese Vielzahl von Zerfallsmöglichkeiten macht die Datenauswertung von EMU zu einem harten Puzzle. Doch es lässt sich zusammensetzen. Das Ergebnis: H_3O^+ liefert in 20 Prozent aller Zerfälle Wasser. Überraschend war dabei, dass die Moleküle energetisch hoch angeregt sind. „Es entsteht gewissermaßen aus kalten Stößen heißes Wasser“, erklärt Wolf.

VIELE FINGERABDRÜCKE, ABER KEINE PASSENDEN TÄTER

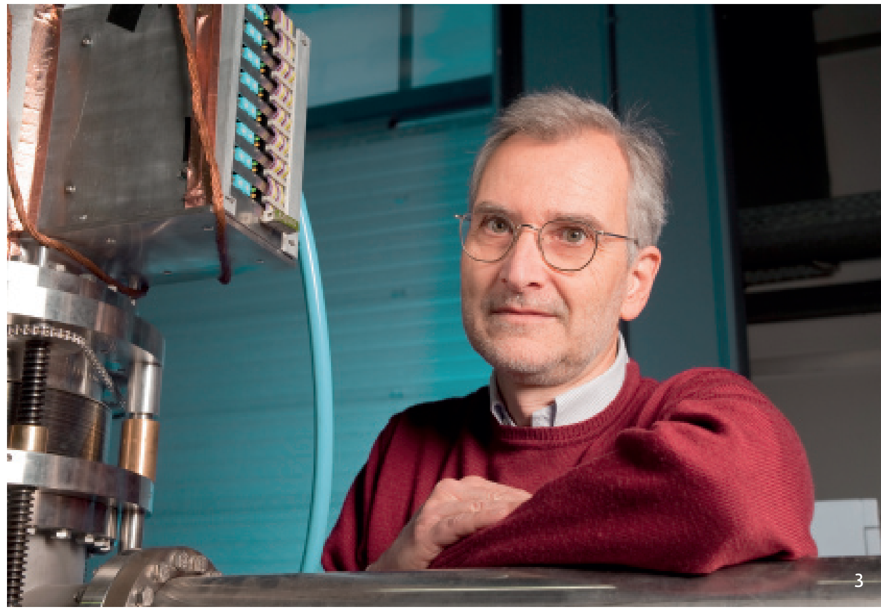
Diese Ergebnisse tragen in zweierlei Hinsicht zur Himmelsforschung bei. Die Messdaten gehen einerseits als Parameter in Computermodelle ein, mit denen das komplexe Reaktionsnetz in interstellaren Wolken berechnet wird; zum anderen dienen sie dazu, Moleküle zu identifizieren. Astronomen weisen sie mithilfe von Spektren nach. Insbesondere im Infrarot- und Radiobereich machen sich die unterschiedlichen Spezies durch eine Fülle von Emissions- oder Absorptionslinien bei ganz bestimmten Wellenlängen bemerkbar – sie hinterlassen gleichsam charakteristische Fingerabdrücke.

Die Identifizierung gelingt nur dadurch, dass man diese Linien mit Laborspektren vergleicht. Bis heute lassen sich jedoch sehr viele Linien keinen bekannten Molekülsorten zuordnen. Einige von ihnen könnten von hoch angeregten Molekülen stammen, die bei der kalten Elektronenanlagerung an ein Muttermolekül frei werden. Das jedenfalls besagen die Heidelberger Experimente.

Grafik: Darstellung nach B. J. McCall, Univ. of Illinois, Urbana, USA



2



3

Darüber hinaus gibt es sogar Auswirkungen auf die Biologie. Vor einigen Jahren fand ein Team von Wissenschaftlern aus Kanada und den USA Hinweise darauf, dass der Träger der Erbinformation, das DNA-Molekül, bei der Anlagerung von Elektronen zerbrechen kann. Auch hier scheinen bestimmte Energien aus quantenphysikalischen Gründen bevorzugt zu sein. Die Versuche am TSR bestätigen diese Hypothese.

Allerdings sind die Experimente am Max-Planck-Institut für Kernphysik nicht mit solch großen Biomolekülen möglich, weil sich im TSR nur Ionen mit einer Höchstmasse von etwa 40 atomaren Masseneinheiten (*unified atomic mass unit*, abgekürzt u) speichern lassen. Zum Vergleich: Das H_3O^+-Ion besitzt 19 u, Ethylenglykol ($HOCH_2CH_2OH$) bereits 62 u. Diese Massenbeschränkung will Andreas Wolf mit einem neuen Speicherring überwinden. Der *Cryogenic Electrostatic Storage Ring* (CSR) wird mit einem Umfang von 35 Metern kompakter sein als sein Vorgänger. Was ihn aber vor allem auszeichnet, ist eine Kühlung mit flüssigem Helium auf zwei Kelvin. Sie wird es ermöglichen, Molekülionen mit größeren Massen bis zu biologischen Makromolekülen zu speichern. Kalte Elektronen-Anlagerungsexperimente werden für Moleküle bis 160 u möglich sein – nicht für eine DNA, wohl aber für Aminosäuren.

Eine Testeinrichtung ist schon so weit gediehen, dass sie für einfache quantenphysikalische Experimente genutzt werden kann. Den „ersten Strahl" im kryogenen Speicherring erwartet Wolf für das Jahr 2012. Mit speziellen Detektoren wird er dann auch anderen Gruppen des Heidelberger Instituts für ihre Experimente zur Verfügung stehen. Mit der Heliumkühlung weist der CSR eine Gemeinsamkeit mit dem LHC in Genf auf. „Den technischen Herausforderungen begegnen wir im Maßstab dieser Anlage durch gezielte Entwicklungen und schrittweise Tests der Komponenten", sagt Andreas Wolf.

So werden die Physiker in der Abteilung für gespeicherte und gekühlte Ionen auch in Zukunft zu einem besseren Verständnis der komplexen Astrochemie beitragen, grundlegende quantenphysikalische Aspekte von Molekülen aufdecken und die Suche nach zuverlässigen theoretischen Modellen unterstützen. ◂

GLOSSAR

Elektron
Elementarteilchen mit negativer Elementarladung. In Atomen und Molekülen bilden die Elektronen die äußere Elektronenhülle. Sie bestimmt die chemischen Reaktionen.

Ion
Ein Atom oder Molekül, das eines oder mehrere Elektronen verloren oder gewonnen hat und somit elektrisch positiv beziehungsweise negativ geladen ist.

Opazität
Die Opazität (Adjektiv: opak) ist ein Maß für die Lichtundurchlässigkeit von Stoffen. Je größer die Opazität eines Stoffes ist, desto weniger Licht durchdringt ihn und desto trüber erscheint er. Im Weltall zeigt sich diese Trübung vor allem an interstellaren Gas- und Staubwolken.

Proton
Baustein der Atomkerne mit positiver Elementarladung. Es besteht aus drei Quarks und ist rund 1800-mal schwerer als das Elektron.

Das Forschungsprogramm entstand durch die enge Zusammenarbeit mit Dirk Schwalm als Direktor des Bereichs Schwerionenphysik am Max-Planck-Institut für Kernphysik bis 2005 und mit Daniel Zajfman als Forschungsgruppenleiter am Weizmann Institute of Science im israelischen Rehovot. Es beruht auf der Mitarbeit vieler früherer und jetziger Mitglieder der Arbeitsgruppe. Der seit 2007 bestehende Bereich „Gespeicherte und gekühlte Ionen" von Klaus Blaum schafft beste Bedingungen für dieses Forschungsfeld und erweitert seine Möglichkeiten durch den Aufbau des kryogenen Speicherrings CSR.

Rasterfahndung **im Reich der Viren**

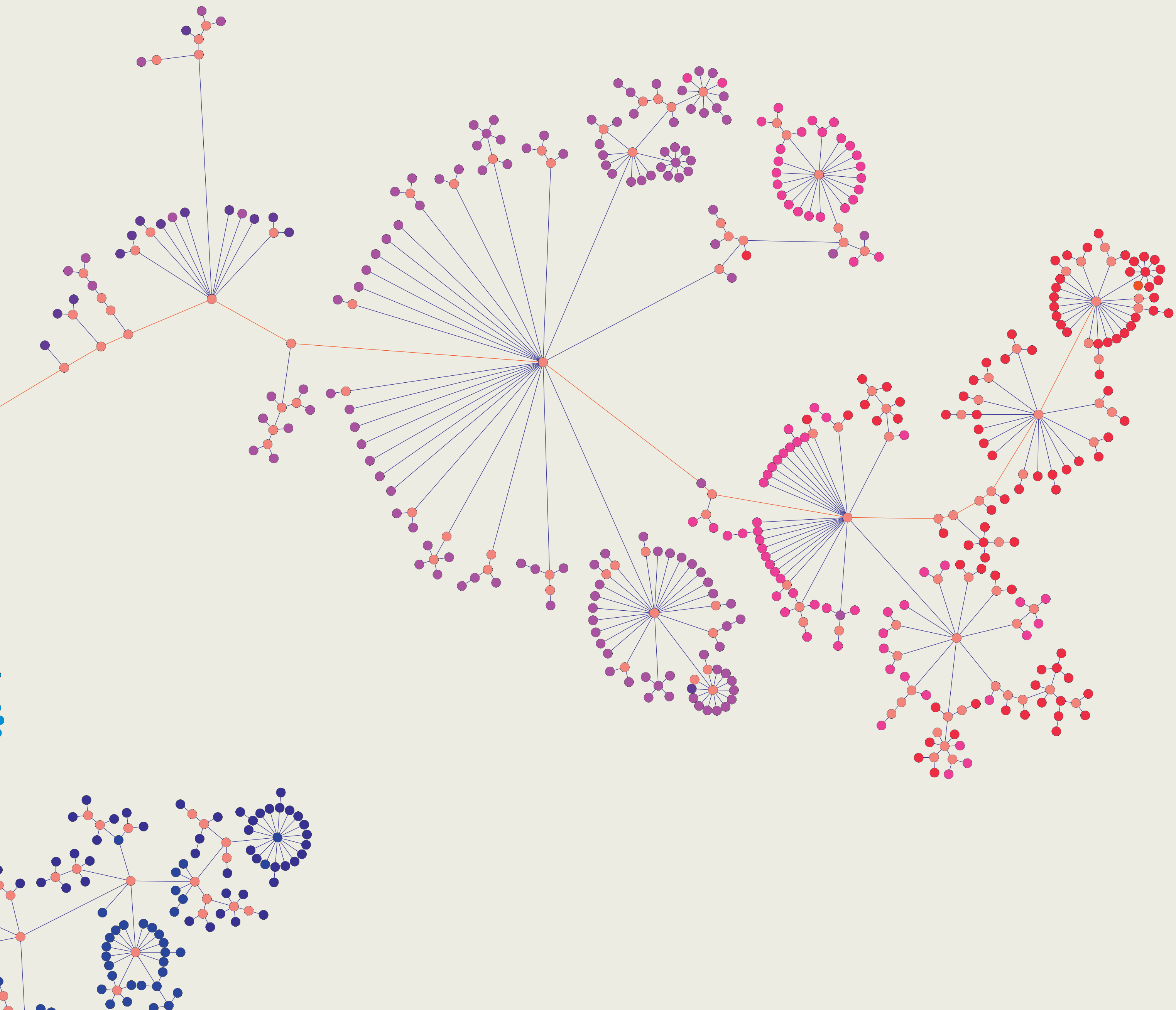
Mit Rechenkraft rüsten Wissenschaftler zum Kampf gegen die Grippe. Experten um **Alice Carolyn McHardy** aus dem **Max-Planck-Institut für Informatik** in Saarbrücken entwickeln Software, die im Erbgut von Viren verdächtige Strukturen findet, mit denen sich der nächste Auslöser einer weltweiten Grippewelle verrät – noch ehe die Grippesaison begonnen hat.

TEXT **TIM SCHRÖDER**



Evolution des Grippe-Virus H3N2: Stammbaum für die Gensequenz des Oberflächenproteins Hämagglutinin. Die Farbe der Endknoten gibt den Zeitpunkt an, zu dem eine bestimmte Sequenzvariante aufgetreten ist. Damit können Wissenschaftler die Entstehung der verschiedenen Virusstämme verfolgen und Prognosen zu möglichen neuen Varianten abgeben.





Grafik: MPI für Informatik

Ein Schniefen im Flugzeug, ein Husten in der Bahn: In der kalten Jahreszeit denkt man dabei sogleich an die Grippe. Und seit dem Frühjahr 2009 wandert ein neuer Erreger um die Welt. Mit dem Menschen ist er per Flugzeug und Schiff von Amerika in alle anderen Kontinente vorgestoßen. Der Erreger hat es im Herbst 2009 sogar auf die Titelseiten der Zeitungen geschafft – das H1N1-Virus.

22000 Menschen sind bis Mitte Januar 2010 weltweit an dieser „Schweinegrippe“ genannten Infektion gestorben. Wie viele infiziert sind, kann niemand sagen. Sicher aber ist, dass H1N1 der Menschheit die erste weltumspannende Grippe beschert, die erste Pandemie des 21. Jahrhunderts. Dabei ist der Erreger bisher vergleichsweise harmlos: 1918 rafft ein Vorfahr des neuen H1N1-Virus fast 50 Millionen Menschen dahin. Diese Pandemie geht als „Spanische Grippe“ in die Geschichte ein. Seltsamerweise tötet sie vor allem junge, starke Menschen. Ältere und Schwache bleiben verschont.

IMPFSTOFFENTWICKLUNG – EIN WETTLAUF GEGEN DIE ZEIT

Lange hatten Mediziner dafür keine Erklärung. Erst vor wenigen Jahren konnten Forscher Ähnliches bei Affen beobachten. Ganz offensichtlich lässt der Erreger das Immunsystem überkochen. Wird ein Mensch infiziert, schüttet dessen Immunabwehr über die Maßen Infektionsbotenstoffe aus – entzündungsfördernde Substanzen, die eigentlich helfen sollen, den Erreger zu bekämpfen, dabei aber auch das körpereigene Gewebe an-



Alice McHardy leitet die Forschungsgruppe Computational Genomics and Epidemiology am Max-Planck-Institut für Informatik.

» Ein Ziel der Bioinformatiker: In Zukunft soll der Computer verdächtige Strukturen im Virenerbgut finden, mit denen sich der nächste Auslöser einer weltweiten Grippewelle verrät, noch ehe die Grippesaison begonnen hat.

greifen. Vor allem die Immunsysteme junger, starker Menschen leisteten hierbei zu viel des Guten.

Inzwischen kennen Wissenschaftler die Grippe-Erreger recht gut. Längst hat man sie in verschiedene Gruppen eingeteilt, säuberlich getrennt nach genetischen Eigenschaften und charakteristischen Eiweißstrukturen. Gegen menschliche Grippeviren werden jedes Jahr größere Mengen Impfstoff produziert, die vor einer Infektion schützen sollen. Manchmal aber verändern sich die Viren an irgendeinem Ort der Welt so schnell und unerwartet, dass der Mensch machtlos ist. Ein neuer Erreger verbreitet sich, gegen den der vorhandene Impfstoff nicht helfen kann. Der Kampf gegen die Grippeviren ist deshalb vor allem ein Wettlauf gegen die Zeit.

Gelingt es den Wissenschaftlern rechtzeitig, eine neue Virus-Variante aufzuspüren, die sich in der nächsten bevorstehenden Grippewelle weltweit durchsetzen wird? Nur dann können sie die Impfstoffe an die neuen Erreger anpassen, ehe diese eine große Grippewelle auslösen. Meist gewinnen die Forscher das Rennen. Durchschnittlich alle vier Jahre aber sind die Viren schneller.

Wissenschaftler aus dem Max-Planck-Institut für Informatik in Saarbrücken rüsten deshalb mit Rechenkraft zum Kampf gegen die Erreger. Die Experten um Alice Carolyn McHardy entwickeln Software, die darauf spezialisiert ist, aus dem Erbgut von Viren oder auch Bakterien Geheimnisse herauszulesen. Ein Ziel der Bioinformatiker: In Zukunft soll der Computer verdächtige Strukturen im Virenerbgut finden, mit denen sich der nächste Auslöser einer weltweiten Grippewelle verrät, noch ehe die Grippesaison begonnen hat.

WELCHE MUTATION MACHT DAS VIRUS GEFÄHRLICH?

Es gibt insgesamt drei Typen von Influenzaviren: Typ A, B und C. Die bedeutendsten sind die Erreger der Influenza A, zumal sie die großen Pandemien auslösen. Von der Influenza A existieren viele Dutzend verschiedener Grippevirenstämme, die in Vögeln, aber auch in Schweinen zirkulieren. Aus diesen tierischen Viren geht mitunter ein Virus hervor, das den Sprung zum Menschen schafft – so wie das Virus der aktuellen Schweinegrippe. Die gewöhnlichen menschlichen Grippeviren hingegen entwickeln sich Jahr für Jahr weiter, vor allem in Südostasien. Von dort aus verbreiten sie sich alljährlich pünktlich zur Grippesaison rund um die Welt.

Ein Grippevirus gleicht einer stachligen Kugel. Bei diesen Stacheln handelt es sich um das Eiweiß Hämagglutinin. An seiner Spitze sitzt eine Art Schlossstruktur, mit der das Virus gezielt an die Oberfläche von tierischen oder menschlichen Zellen andocken kann. Es hängt vor allem von der Feinstruktur dieser Bindestelle ab, ob die Strukturen auf der Zelloberfläche wie ein Schlüssel ins Schloss zum Viren-Hämagglutinin passen – und ob ein Virus so Zugang in eine Zelle erhält. Finden beide zueinander, nimmt das Unheil seinen Lauf. Die Membran der Wirtszelle öffnet sich, das Virus gleitet in die Zelle hinein und entlässt seine Erbgutstränge ins Zellinnere.

Das Virus programmiert die Zelle in einen willfährigen Zombie um: Die Zelle wird zur Virenproduktionsstätte. Sie synthetisiert brav Virenbestandteile, die anschließend zu Hunderten neuer Viren zusammengesetzt werden. Dann wird ein zweites wichtiges Viren-Eiweiß, die Neuraminidase, aktiv. Sie öffnet die Zellmembran, sodass die frischen Viren wie Kampfsoldaten aus einem Truppentransporter herausströmen.

Viren können verschiedene Varianten des Hämagglutinin-Proteins (H) oder der Neuraminidase (N) auf ihrer Hülle tragen, und entsprechend werden sie klassifiziert: H1N1 oder H3N2 etwa. Doch wie verwandeln sich Viren aus Schweinen in potente menschliche Krankheitserreger? Zum einen durch Veränderungen in ihrem Erbgut. Viren vermehren sich in rasender Geschwindigkeit. Infizierte Körperzellen geben schon nach wenigen Stunden Millionen neuer Viren frei. Für jede neue Virengeneration muss das Erbgut verdoppelt werden. Dabei treten häufig Fehler auf. Manche Erbgutbausteine (die Basen) werden beim Ablesen der Erbgutvorlage falsch kopiert. Gelegentlich sind solche Mutationen für das Virus selbst tödlich. Manchmal sind sie irrelevant. Von Zeit zu Zeit aber wird das Virus dadurch erst richtig gefährlich.

Foto: Manuela Meyer

Und noch etwas macht die Grippeviren unerhört wandlungsfähig: Ihr Erbgut liegt nicht als einzelner Strang vor, sondern ist säuberlich zu acht einzelnen Paketen, den Segmenten, verpackt. Solche Pakete können wie die Koffer am Flughafen durchaus einmal vertauscht werden. Das kann passieren, wenn eine Zelle zugleich von zwei Viren infiziert wird – einem menschlichen Virus und einem Schweinevirus zum Beispiel. Beide Viren ergießen ihre Erbgutsegmente in die Zelle – insgesamt 16 Segmente, die in atemberaubender Geschwindigkeit vervielfältigt werden.

EIN GEFÄHRLICHER TAUSCH

Hin und wieder passiert es dann: Beim Zusammenbau der jungen Viren bugsiert der Vervielfältigungsapparat ein Segment vom falschen Virus in die Nachkommen. *Reassortment* nennt man diesen Tausch. So war es möglicherweise auch bei der Schweinegrippe, verschiedene Viren trugen Segmente zum neuen Virus bei. Und das veränderte seine Eigenschaften so, dass es zu einem Krankmacher wurde, der sich auch zwischen Menschen überträgt.

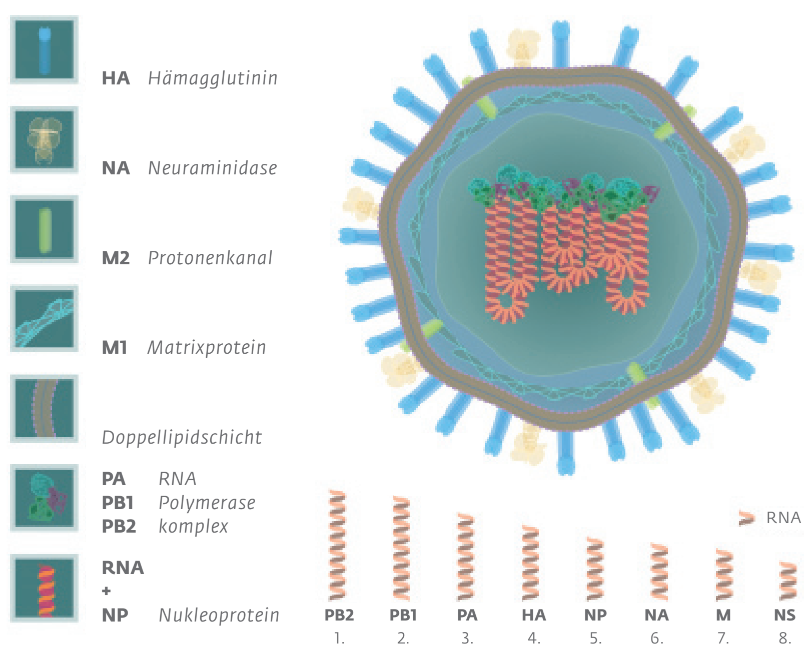
Spritzt man den gegen das H1N1-Virus entwickelten Impfstoff, so produziert der Körper Abwehrstoffe, die das Hämagglutinin auf dem Virus erkennen und lahmlegen. Das Virus kann nicht mehr an die Zellen andocken. Die Infektion wird gestoppt.

Permanent halten Forscher Ausschau nach genetischen Veränderungen in Influenza-A-Viren, die gefährlich werden könnten. Nicht nur bei dem neuen H1N1-Schweinegrippe-Virus, auch bei anderen bekannten Verdächtigen wie etwa dem klassischen menschlichen H1N1 oder H3N2. Das weltweite Fahndungsraster ist dicht. Im Auftrag der Weltgesundheitsorganisation WHO werden permanent an 112 Instituten und Kliniken in 83 Ländern Blutproben von Patienten genommen, genanalysiert und an vier große Grippe-Zentren geschickt.

Alle sechs Monate tagt ein Expertengremium, das die aktuellen Genanalyse-Daten prüft, um verdächtige Mutationen oder gar *Reassortments* auszuspähen. Die Fachleute versuchen aus den Genabschnitten herauszulesen, wie sich dadurch die Gestalt des Virus, seiner Eiweiße, des Hämagglutinins und des Antigens verändern wird, sodass das Virus den aktuellen Impfstoff umschiffen kann. Sie versuchen vorauszusehen, wie ein neuer Impfstoff aussehen muss, um gegen ein solches Virus helfen zu können – sollte es tatsächlich gefährlich werden. Entsprechend entwickelt man die Impfstoffe sukzessive weiter, passt sie an die modernen Influenza-A-Typen an. Doch das klappt nicht immer.

„Bis heute hat man die genauen Zusammenhänge zwischen den genetischen Veränderungen und dem Auftauchen einer neuen Grippevariante nicht völlig verstanden“, sagt Alice Carolyn McHardy, Leiterin der unabhängigen Forschungsgruppe Computational Genomics & Epidemiology. „Warum führen zum Beispiel manche *Reassortments* dazu, dass Viren krank machen, andere *Reassortments* aber nicht?“ Müssen dazu noch andere genetische Merkmale vorliegen? McHardy verwandelt die Computer in ihrem Saarbrücker Büro deshalb in Prognose-Werkzeuge, die die komplexen Zusammenhänge entwirren sollen.

Dazu verwendet sie statistische Lernverfahren. „Solche Verfahren sind in der Lage, verschiedenste Datensätze miteinander in Beziehung zu setzen und verborgene Zusammenhänge aufzuspüren.“ Zunächst füttert man das Lernverfahren mit bekannten Daten – etwa der genetischen Information von Viren, die in der Vergangenheit Grippeepidemien ausgelöst haben; hinzu kommt das Wissen darüber, wann und wo die Viren aufgetaucht sind oder wie



Schematische Darstellung des Influenza-A-Virus. Das Virus ist von einer Lipidmembran umgeben, aus der verschiedene Proteine hervorragen. Mithilfe der Membranproteine Hämagglutinin (HA) und Neuraminidase (NA) können die Erreger an ihre Wirtszellen andocken und sie später wieder verlassen. Diese Proteine sind aber auch die Schwachstellen des Erregers: Sie können von Antikörpern des Immunsystems blockiert werden. Das Erbgut des Virus besteht aus acht RNA-Segmenten, an die verschiedene Proteine angelagert sind.

Grafik: MPI für Informatik

» Forscher sammeln schaufelweise Bodenproben ein und analysieren das gesamte Erbgut aller Bodenbewohner. Die Hoffnung: Möglicherweise findet man dabei vielversprechende Genabschnitte, welche die Information für neue Supereiweiße enthalten.

die Eiweißstruktur des Hämagglutinins aussieht. Wie ein Rasterfahnder lernt der Computer damit die Täterprofile bekannter Viren kennen.

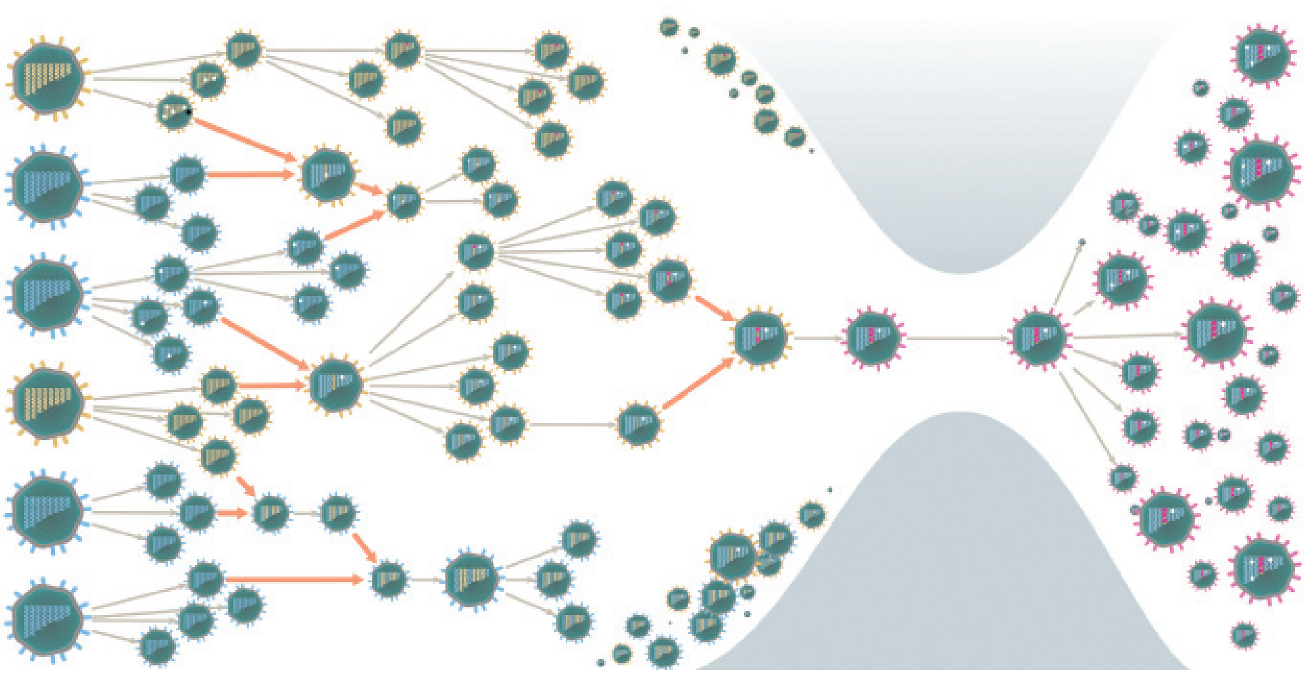
ZUVERLÄSSIGERE PROGNOSE DES DOMINANTEN VIRUS

Hat das Verfahren mit den Datensätzen ausgiebig trainiert, geht es richtig los. McHardy füttert den Computer mit den genetischen Informationen eines Influenza-A-Virus, von dem noch niemand weiß, wie gefährlich es ist. Das Lernverfahren gleicht die neuen Daten mit dem bekannten Wissen ab, es ordnet die Information so, dass sich die aktuellen Eingabewerte möglichst stark den erlernten Mustern annähern.

Als Antwort liefert der Rechner dann einen Zahlenwert der Art: Wie stark ähnelt die neue Gensequenz den Strukturen eines erfolgreichen Virus? Wie wahrscheinlich ist es also, dass eine Krankheit ausbricht? McHardy arbeitet dabei vor allem mit „Support-Vektor-Maschinen“ (SVM). Die wandeln Information in Datenpunkte, in Zahlenwerte, die wie Sterne am Firmament in einem riesigen Zahlenraum hängen. Gibt man neue Daten in das System ein, ordnet die SVM die neuen Werte den schwebenden Zahlen zu – je näher sie einer antrainierten Zahl sind, desto mehr ähneln sich die Daten.

Noch können die Saarbrücker Forscher keine aktuellen Voraussagen für die neue Grippesaison liefern, noch werden die Programme optimiert. Doch immerhin: Als McHardy zu Testzwecken die Daten eines altbekannten Grippevirus in die SVM einspielte, antwortete die brav mit „sehr wahrscheinlich infektiös“.

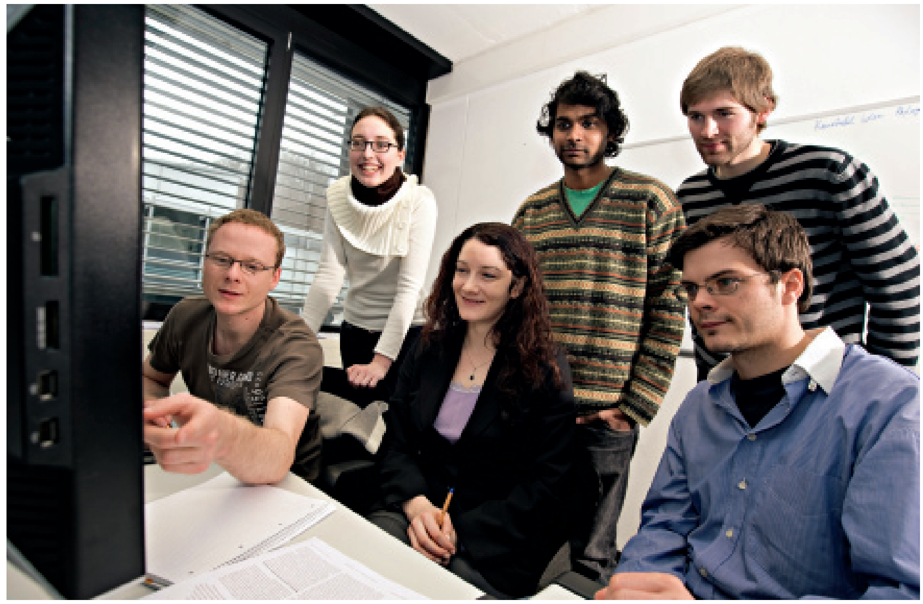
„Wir wollen aber nicht nur herausfinden, ob sich eine neue Virenvariante in Zukunft durchsetzt und zum Grippeerreger der Saison wird“, sagt McHardy. „Wir wollen auch voraussagen können, wann das sein wird.“ Derzeit versuchen die Experten der WHO für etwa ein Jahr vorauszusehen, welcher neue Virenstamm dominieren und sich damit in der jeweils nächsten Grippesaison als Krankmacher über die Welt verbreiten wird. Heute liegen sie in einem von vier Fällen daneben: Dann



Die Vielfalt der Grippe-Viren: In der Bevölkerung kursieren unterschiedliche Stämme von Influenza-A-Viren (gelbe und blaue Viruspartikel), die sich im menschlichen Körper vermehren (weiße Pfeile). Durch Neuverteilung des Erbguts zwischen zwei Virusstämmen (*Reassortment*, orange Pfeile) und Mutationen (weiße Punkte) entstehen viele verschiedene Erbgut-Varianten. Mit der Zeit wird der Körper gegen diese Varianten immun, hier dargestellt als ein enger werdender Flaschenhals. Virusstämme mit Mutationen, die zu veränderten Oberflächenproteinen führen (rote Punkte), werden nach und nach immer häufiger, bis schließlich eine Variante entsteht, gegen die das Immunsystem machtlos ist. Sie kann Infektionen auslösen und neue, ähnliche Stämme hervorbringen.

Grafik: MPI für Informatik





Mit Rechenkraft gegen Grippe: Die Wissenschaftler der Forschungsgruppe Computational Genomics and Epidemiology auf der Suche nach dem Auslöser künftiger Grippe-Epidemien. Unser Bild zeigt (hinten von links) Christina Tusche, Kaustubh Patil, Johannes Droege, sowie (unten von links) Lars Seinbrück, Alice McHardy und Sebastian Konietzny.

setzt sich eine andere Virenvariante als erwartet durch, gegen die es dann oftmals keinen Impfstoff gibt.

McHardys Ziel ist es, diese Jahresvorhersage zuverlässiger zu machen. Auf der Nordhalbkugel tritt die Grippe vor allem in den Monaten November bis Februar auf, wenn es kalt und feucht ist. Auf der Südhalbkugel wiederum werden die Menschen im südlichen Winter krank – zwischen Mai und Oktober. Auch solche Daten fließen in die SVM und die anderen Lernverfahren ein, um die Viren verstehen zu können. Dass eine sichere Prognose dereinst möglich ist, daran zweifelt McHardy nicht. Immerhin wurde an ihrem Institut bereits das Software-Programm „Geno2Pheno" entwickelt, mit dem Ärzte ermitteln können, wie schnell sich Resistenzen gegen Aids-Medikamente entwickeln (MaxPlanckForschung 3/2005, Seite 20 ff.).

Außerdem kann McHardy aus dem Vollen schöpfen, denn auf den Servern im Keller ruht die weltgrößte Viren-Gendatenbank GISAID. Seit wenigen Jahren speisen Forscher aus aller Welt Ergebnisse aus der Genanalyse von Influenza-Viren in die Datenbank ein. Andere Forscher dürfen kostenlos darauf zugreifen. „Es ist absolut sinnvoll, das Wissen über die Viren zu bündeln, um ihr Wesen gänzlich verstehen zu können", sagt McHardy. „Die Viren sind kleine Lebensformen mit einem recht überschaubaren Genom, da bietet es sich an, direkt in ihnen nach den Ursachen der Grippe zu forschen."

Viren sind das eine. McHardys zweites Steckenpferd ist das Erbgut von Bakterien, das sie ebenfalls mit Support-Vektor-Maschinen und verwandten Lernverfahren enträtseln will. Die Forscherin hat sich darauf spezialisiert, Ordnung in Metagenome zu bringen – in mikrobiellen Gensequenzsalat. Ein solches Metagenom enthält nicht die Erbsubstanz eines einzigen Individuums, sondern von vielen Millionen Organismen. Doch wozu das Durcheinander studieren?

SUCHE NACH SUPEREIWEISSEN

Bekannt ist, dass gerade extreme Lebensräume wie etwa heiße Quellen besondere Lebensformen hervorbringen – Bakterien etwa, die sogar in 120 Grad Celsius heißem Wasser gedeihen. Wissenschaftler und die Industrie versprechen sich davon neue Substanzen wie hitzebeständige Eiweiße. Die könnte man beispielsweise für Herstellung von Kosmetika oder Nahrungsmitteln verwenden, für Produktionsprozesse, die bei hohen Temperaturen ablaufen. Wissenschaftler suchen deshalb am Land und im Meer nach neuen außergewöhnlichen Mikroben.

Der einfachste Weg wäre es, die Einzeller im Labor zu züchten und auf Herz und Nieren nach neuen Substanzen zu durchsuchen. Doch viele Bakterien gedeihen im Reagenzglas nicht. Forscher packen deshalb seit geraumer Zeit richtig zu, sammeln schaufelweise Bodenproben ein und analysieren gleich das gesamte Erbgut aller Bewohner. Die Hoffnung: Möglicherweise findet man dabei vielversprechende Genabschnitte, die die Information für neue Supereiweiße enthalten.

Das Problem: Meist liefert die Metagenom-Analyse Tausende winziger Erbgutfragmente, von denen sich nur wenige einem Organismus zuordnen lassen. Hier kommen McHardys Verfahren zum Einsatz, die die Forscherin zunächst mit Erbgutfragmenten bekannter Bakteriengruppen gefüttert hat. Die Support-Vektor-Maschine wurde dabei vor allem auf ein Merkmal im Bakteriengenom trainiert: kurze, wiederkehrende Abfolgen von Basen – sogenannte Oligomere, wie etwa die Basenfolge ACTGAT. Faszinierenderweise sind bestimmte Oligomere charakteristisch für die Genome verschiedener Bakteriengruppen, ganz wie ein Fingerabdruck.

Diese Oligomere kommen nicht nur an einer, sondern zugleich an vielen verschiedenen Stellen des Erbgutstrangs DNA vor. Oligomere eignen sich deshalb hervorragend, um das Metagenom-

Fotos: Manuela Meyer (2)



Grand Prismatic Spring ist die größte Thermalquelle im Yellowstone Nationalpark. Heiße Quellen wie diese beherbergen Bakteriengemeinschaften, die besonders an die extremen Umweltbedingungen angepasst sind. Die einzelnen Bakterienarten lassen sich jedoch meist nicht unter Laborbedingungen züchten. Wissenschaftler analysieren deshalb heute das gesamte Erbmaterial aller Mikroorganismen eines solchen Lebensraumes.

Puzzle zu ordnen. Nachdem die Support-Vektor-Maschine gelernt hatte, welche Oligomere mit welcher Wahrscheinlichkeit zu bestimmten Bakteriengruppen gehören, speiste McHardy unbekannte Metagenomsequenzen ein – etwa solche aus mikrobenreichem Klärschlamm. Wieder schwebten die Daten im weiten Zahlenraum den erlernten Zahlenwerten entgegen. Das Experiment gelang: „Dank der charakteristischen Oligomere konnte das Programm viele der kurzen Metagenomsequenzen bestimmten Bakterien zuordnen."

VERDAUUNG OHNE METHANAUSSTOSS

Binning heißt das Verfahren – „Eintonnen": Schnipsel für Schnipsel wird der richtigen Bakteriengruppe zugeordnet – der jeweiligen „Tonne" also. In manchen Fällen können die statistischen Lernverfahren bis zu 90 Prozent der Erbgutschnipsel anhand der Oligomere richtig zuordnen. Letztlich hängt es vor allem von der Menge und Qualität der Trainingsdaten ab, wie gut die Statistik arbeitet. Gelegentlich haben die Saarbrücker daher Werte von nur 30 bis 40 Prozent erreicht.

Zu den wohl verblüffendsten Metagenom-Untersuchungen, bei denen Alice Carolyn McHardy mitgeholfen hat, gehört die Analyse von Bakteriengemeinschaften aus dem Darm von Termiten und aus dem Verdauungstrakt des australischen Wallabys, eines Buschkängurus. Beide Tierarten verdauen Holz und setzen dabei Wasserstoff frei, jenes Molekül, das die Menschheit künftig im großen Stil in Brennstoffzellen nutzen will.

Was die Verdauungsarbeit der Insekten und Säuger auszeichnet, ist, dass bei der Wasserstoffproduktion anders als beim Kuhmagen fast kein klimaschädliches Methangas frei wird. Gelänge es, das Verfahren im Labor nachzuahmen, ließe sich damit möglicherweise eine ganz neue Art der umweltfreundlichen Wasserstoffproduktion entwickeln.

Die Analyse-Ergebnisse sind vielversprechend. McHardys SVM konnte die entscheidenden Metagenomschnipsel verschiedenen Mikroorganismen zuordnen. Damit ist jetzt bekannt, welche Bakterien im Tierdarm das Wunder der klimaneutralen Wasserstofferzeugung vollbringen – und auch, welche Eiweiße und Stoffwechselprozesse zum Wasserstoff führen. „Jetzt wird daran gearbeitet, aus den Proben gezielt die beteiligten Mikroorganismen herauszufischen und weiter zu untersuchen", sagt McHardy.

Noch steht die Metagenom-Analyse am Anfang. Viele Lebensräume wurden bislang nur holzschnittartig untersucht. „Und natürlich benötigen wir stets ein wenig Vorwissen, um unsere Verfahren anzulernen", sagt die Max-Planck-Forscherin. „Der Vorteil der SVM besteht aber darin, dass sie nur kleine Datenmengen für das Training benötigt." Und was sich damit bereits erreichen lässt, hat McHardy gezeigt. Die Suche nach den Geheimnissen des Erbguts geht weiter. Mit der Suche in extremen Lebensräumen wie der Arktis, wo Bakterien bei Minusgraden gedeihen, wird die Metagenomik zunehmend interessant. Und dank der Bioinformatik dürfte sich in naher Zukunft zur Wallaby-Darmflora noch manch andere skurrile Neuentdeckung hinzugesellen. ◂

GLOSSAR

Pandemie
Unter Pandemie versteht man eine Krankheit – meist eine Infektion –, die sich in vergleichsweise kurzer Zeit über Länder und Kontinente ausbreitet.

Reassortment
Auch Reassortierung genannt, ist die Vermischung oder Neuverteilung genetischer Information zwischen zwei ähnlichen Viren. Dazu müssen sich die beiden Virustypen in derselben infizierten Zelle vermehren und muss ihr Genom aus mehreren Segmenten bestehen.

Metagenom
Als Metagenom bezeichnet man das gesamte genetische Repertoire eines Lebensraums – eines Felsens im Hochgebirge etwa oder des Rands einer heißen Quelle.

Neuraminidasen
Enzyme, die in der Membran vieler Viren fest verankert sind. Sie fungieren gleichsam als „Türöffner", indem sie die Zellmembran aufschließen, sodass die frischen Viren herausströmen und sich verbreiten können.



Glanzlichter der Wissenschaft 2009

Ein Almanach

Herausgegeben vom Deutschen Hochschulverband

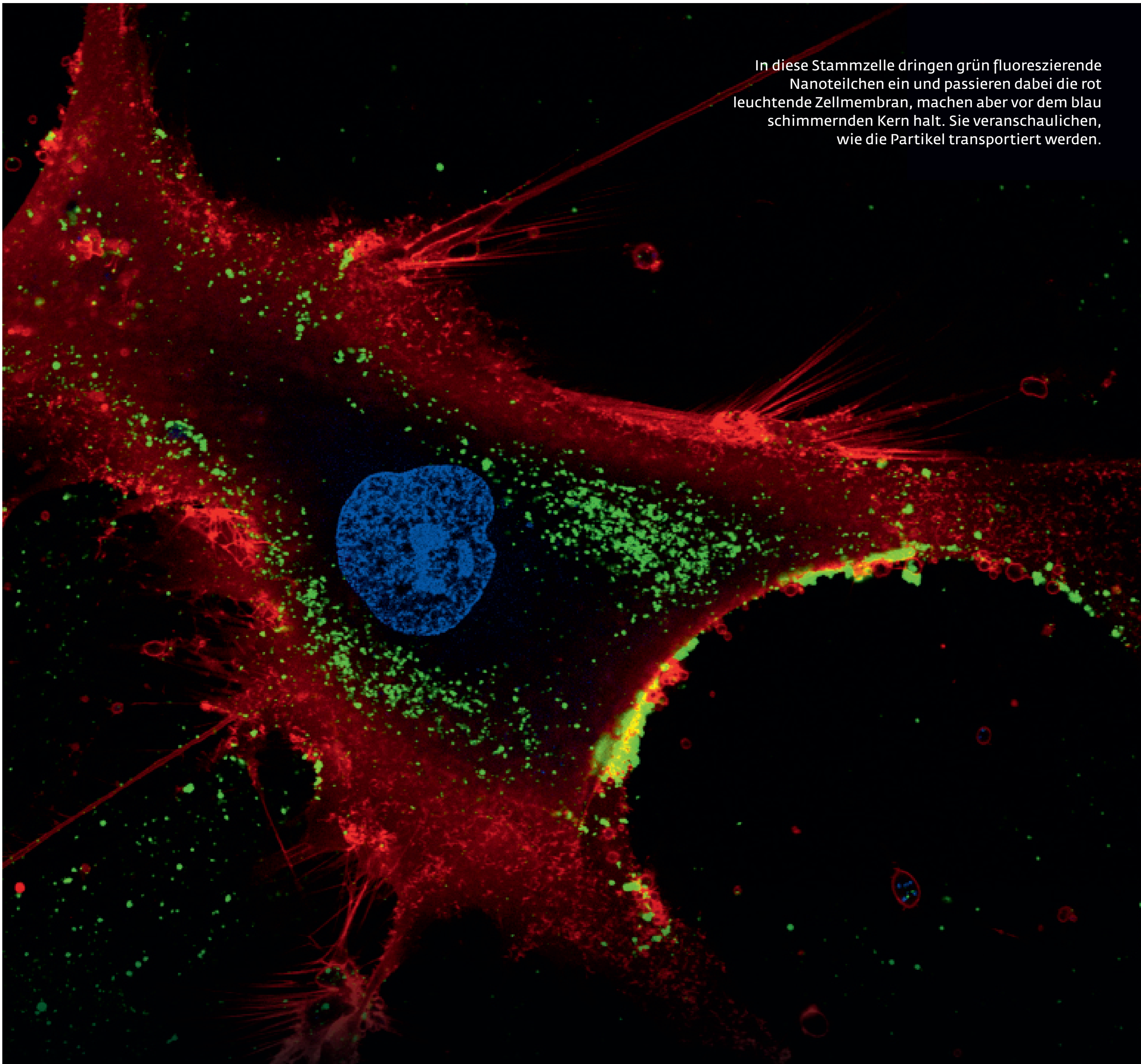
2009. 180 S., geb. € 25,90 plus Porto (für Mitglieder des Deutschen Hochschulverbandes 19,90 € plus Porto).
ISBN 978-3-8282-0488-1

Der Sammelband „Glanzlichter der Wissenschaft" vereinigt herausragende wissenschaftliche Veröffentlichungen und Vorträge renommierter Autoren, die im Laufe des Jahres 2009 entstanden sind. Sie spiegeln Entwicklungen, die über den Tag und das Jahr ihrer Veröffentlichung hinaus Bedeutung behalten – als Beispiele für die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den Themen unserer Zeit.

Inhaltsübersicht

DEUTSCHER HOCHSCHUL VERBAND
Köpfe die Wissen schaffen

Deutscher Hochschulverband · Rheinallee 18 · 53173 Bonn
E-Mail: dhv@hochschulverband.de · Fax: 0228 / 902 66 80



In diese Stammzelle dringen grün fluoreszierende Nanoteilchen ein und passieren dabei die rot leuchtende Zellmembran, machen aber vor dem blau schimmernden Kern halt. Sie veranschaulichen, wie die Partikel transportiert werden.

Zauberkugeln aus Öl und Wasser

Egal ob als Vehikel für Medikamente, in Farben oder für die Produktion von Datenspeichern – die Nanokugeln und -kapseln, die **Katharina Landfester** und ihre Mitarbeiter am **Max-Planck-Institut für Polymerforschung** produzieren, versprechen vielfältigen Nutzen. Möglich gemacht haben das erst fundamentale Erkenntnisse über ihre Herstellung.

TEXT **PETER HERGERSBERG**

Als Katharina Landfester zum ersten Mal ein Gläschen mit der milchigen Flüssigkeit in der Hand hielt, ahnte sie noch nicht, was da drinsteckt. In dem Gefäß schwappte eine Mixtur, die so unscheinbar ist wie ihr Name und mit Milch nicht nur das Aussehen teilt: eine Mini-Emulsion. Milch ist dafür ein prima Beispiel. In einer großen Menge Wasser verteilen sich winzige Fetttröpfchen, die nicht zuletzt von Proteinen und Fetten in der Schwebe gehalten werden.

Doch eine Mini-Emulsion aus dem Labor von Katharina Landfester macht mehr als die Milch. Aus ihren Tröpfchen stellt das Team der Chemikerin raffinierte Nanokugeln und -kapseln her und konstruiert auf diese Weise Vehikel für alles Mögliche: Die Teilchen könnten Medikamente gezielt zu Tumoren transportieren oder krankes Gewebe markieren, um es im Computertomographen sichtbar zu machen. Sie könnten aber auch helfen, Daten dichter auf Speicherchips zu packen.

Die Geschichte der multifunktionellen Teilchen beginnt 1997. Als Nachwuchsforscherin arbeitete Katharina Landfester damals mit Kolloiden: Teilchen oder Tröpfchen im Nano- oder Mikromaßstab, die in einem anderen Medium schweben. „Damals wollte ich bei einem Auslandsaufenthalt Anregungen für meine Forschung sammeln", sagt Katharina Landfester, heute Direktorin am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz: „Für Kolloidchemiker gibt es weltweit aber nicht viele Adressen." So ging sie zu Mohammed El-Aasser an die Universität von Betlehem.

Der ägyptische Chemie-Verfahrenstechniker hatte in den 1970er-Jahren erstmals Mini-Emulsionen hergestellt, um eine einfache Route zu feinen Dispersionen zu öffnen: Mischungen, die wie Wand- oder Druckerfarbe sehr kleine Partikeln in einem flüssigen Medium enthalten. El-Aasser mischte die Ausgangsstoffe für Polymere in die ölige Komponente und ließ sie in den Mini-Emulsionen zu Kunststoffen reagieren, die gleich die Form von Nanokugeln annahmen. Allerdings hatte er es dabei nur auf einfache Kugeln abgesehen, die auch nur aus einer einzigen Art von Polymeren bestanden.

Auch in herkömmlichen Emulsionen, in denen die chemische Industrie bereits seit Jahrzehnten kleine Plastikkugeln produziert, sind die Möglichkeiten begrenzt. Nur simple Teilchen, die kaum kleiner als ein tausendstel Millimeter sind, entstehen darin, und ihre Größe variiert oft auch noch sehr stark. In solchen Öl-Wasser-Mischungen irgendeine Fracht zu verkapseln funktionierte nicht, weil die Ausgangsstoffe der Polymere schnell aus den Tröpfchen entweichen, die als chemische Reaktoren dienen.

NANOTEILCHEN MIT ÖFFNER, ANKER UND TARNUNG

In den Mini-Emulsionen, die Mohammed El-Assers Gruppe mixte, hielten die tröpfchenförmigen Nanoreaktoren dagegen dicht. Daher beschlich Katharina Landfester bald das Gefühl, dass darin auch kompliziertere chemische Konstruktionen möglich sein müssten. Dass sie manche Versprechen der Nanotechnik einlösen könnten, hat sie sich damals jedoch auch noch nicht ausgemalt. Genau danach sieht es heute aus.

Die Teilchen, die Katharina Landfester und ihre Mitarbeiter konstruieren, kommen einer Vision recht nah, die sich in den 1990er-Jahren mit der Welt des Winzigen verband. Damals widmeten viele Wissenschaftler ihre Experimente im Nanomaßstab in einen eigenen Forschungszweig um, den sie Nanotechnologie nannten. Schnell entstand die Vorstellung, in gar nicht allzu ferner Zukunft könnten Roboter, kleiner als ein

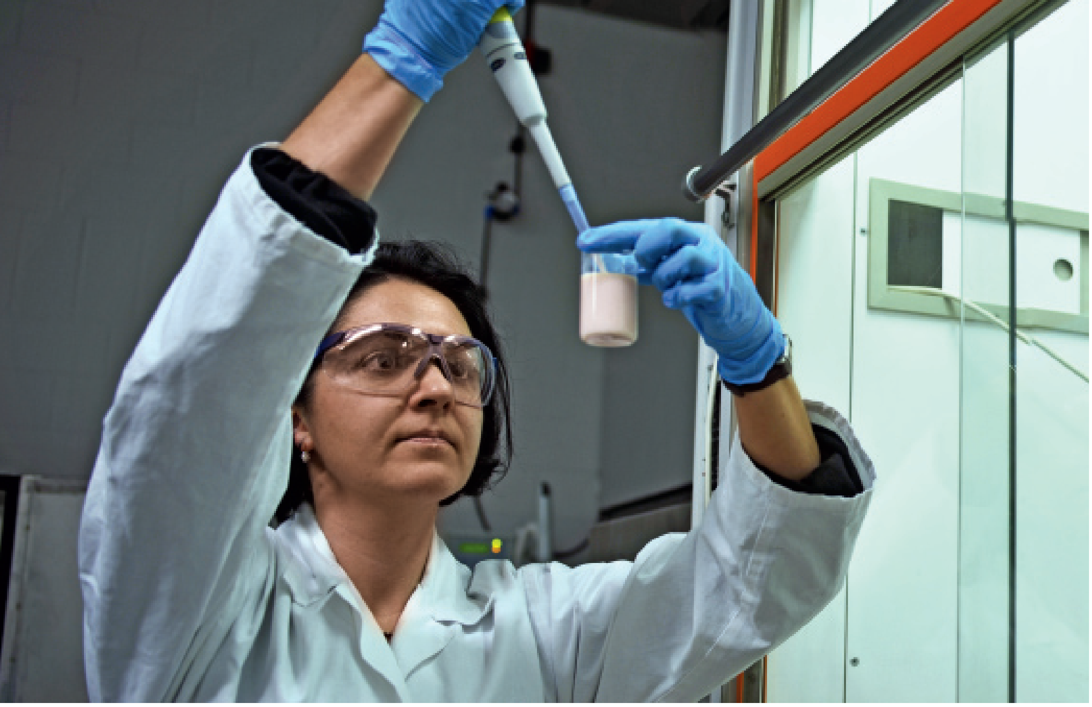


Diese Milch macht's: Katharina Landfester hat herausgefunden, was Mini-Emulsionen stabilisiert, und erzeugt in dieser seither vielseitige Nano-Teilchen.

tausendstel Millimeter, in unserem Körper medizinische Präzisionsarbeit verrichten: Medikamente ausliefern, Adern putzen, wucherndes Gewebe zerstören.

Diese Idee bleibt vermutlich eine Vision, denn so bald wird es für diese Aufgaben wohl keine Nanoroboter geben. Doch immerhin bringen Katharina Landfester und ihre Mitarbeiter peu à peu einige der Jobs ihren Nanopartikeln bei – wenn diese dabei auch weniger spektakuläre Auftritte hinlegen als die Nano-Science-Fiction für winzige Maschinen vorsah.

Die Forscher um Katharina Landfester rüsten die Partikel mit einem Öffnungsmechanismus aus, geben ihnen Anker für bestimmte Zellen oder eine Tarnung, damit sich die Partikel ungehindert durch den Körper bewegen können. Diese Sonderaustattung verdanken die Teilchen allen möglichen Tricks der Chemie, mit denen die Polymerforscher arbeiten. Doch möglich gemacht haben das erst die grundlegenden Erkenntnisse, die Katharina Landfester als Leiterin einer Forschungsgruppe bei Markus Antonietti, Direktor am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung, über Mini-Emulsionen gewann. >





Die wesentlichen Komponenten für die Nanokugeln und -kapseln pipettiert Anna Musyanovych in das Becherglas und homogenisiert die Emulsion anschließend mit einem Ultraschallstab – den Rest erledigt die Chemie.

Denn die Mini-Emulsionen der ersten Generation eigneten sich nicht, eine große Zahl unterschiedlicher Kunststoffteilchen herzustellen. Veränderten die Chemiker ihre Zusammensetzung, schlossen sich die Öltröpfchen über dem Wasser zu einer Ölschicht zusammen, ehe sich das Polymer gebildet hatte. Und wenn sie stabil blieben, war das dem Zufall unterworfen. So schien es zumindest. „Da war klar, dass wir uns die physikalisch-chemischen Prozesse in den Mini-Emulsionen einmal genau angucken müssten", so Landfester: Wären diese verstanden, ließe sich die Zusammensetzung der Mini-Emulsionen vielleicht gezielt wählen, um vielfältige Nanoteilchen zu produzieren.

Wenn sie die Zusammenhänge heute erklärt, beginnt sie mit den Faktoren, die Milch homogen halten: Das fängt mit den Proteinen an, die deren Fetttröpfchen umhüllen. Sie wirken als Tensid, wie ein Spülmittel also, das die Tröpfchen daran hindert, sich zu vereinigen. Trotzdem rahmt Milch, die frisch von der Kuh kommt, schnell auf. Ihre Fetttröpfchen sind zum Teil groß und besitzen eine geringere Dichte, sodass sie nach oben steigen und die Sahneschicht bilden. Daher wird sie homogenisiert: Sie wird auf eine Metallplatte gespritzt, sodass die Fetttröpfchen in kleinere Kügelchen zerplatzen. Die sind so klein, dass ihr Auftrieb nicht mehr ausreicht, um sie an die Oberfläche zu schieben.

Die Mainzer Chemiker homogenisieren ihre Mini-Emulsionen mit einem Ultraschallstab. Für Anna Musyanovych gehört das zum Alltag. Sie leitet die Gruppe, die Chemie in Mini-Emulsionen betreibt. In einem eigens dafür bestimmten Labor stehen mehrere Metallschränke; jeder erreicht etwa die Größe eines Hängeschranks in einer Küche. Darin klemmt Anna Musyanovych kleine Gläschen mit einem Gemisch aus Öl, Wasser und einem Tensid so unter den Ultraschallstab, dass der knapp über dem Boden hängt. Mit einem zischenden Geräusch und nicht besonders starken, aber sehr schnellen Vibrationen zerreißt er die Öltröpfchen zu Nanotröpfchen.

STABILITÄT FÜR WINZIGE TRÖPFCHEN

Doch Tensid und Tröpfchengröße halten eine Emulsion noch nicht mehrere Stunden stabil, nicht lange genug also, um darin Polymere herzustellen. Zur stabilen Mini-Emulsion wird sie erst durch einen Ko-Stabilisator: einen Stoff, der sich fast ausschließlich in den Öltröpfchen löst. „Ich hatte schon vermutet, dass es mit diesem Reagenz etwas auf sich hat", sagt Katharina Landfester.

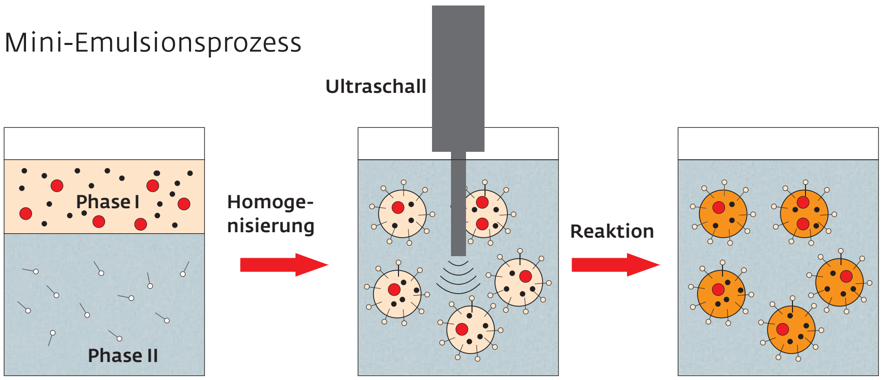
Tatsächlich stellte sie fest, dass die ominösen Substanzen als osmotische Reagenzien wirkten – wenn sie richtig gewählt waren. Auch in der Milch wirken bestimmte Fette wie osmotische Reagenzien, und zwar die besonders wasserunlöslichen. Dahinter kam Landfester, nachdem sie die Prozesse studiert hatte, die Öl und Wasser in einer Emulsion allmählich trennen. Neben den Kontakten zwischen den Tröpfchen, die das Tensid verhindert, trägt dazu die Ostwald-Reifung bei: Größere Öltröpfchen wachsen auf Kosten kleinerer. „In kleineren Tröpfchen herrscht ein höherer Binnendruck", erklärt Katharina Landfester: „Das kennt man von einem Luftballon. Der lässt sich auch schwerer aufblasen, solange er klein ist." Dem Druck in den kleineren Tröpfchen weicht das Öl aus, indem es durch das Wasser in die größeren Tröpfchen diffundiert.

Verhindern lässt sich die Wanderung der Ölmoleküle durch einen Gegendruck. Und genau den baut das osmotische Reagenz auf, das in den Öltröpfchen gelöst ist. Da die Natur immer nach einem Gleichgewicht strebt, fühlt sich das Reagenz nämlich am wohlsten, wenn es sich in allen Tröpfchen gleich hoch konzentriert. Andernfalls kommt es zur Osmose.

Die Osmose erklärt Katharia Landfester wieder mit einem Beispiel aus dem Alltag: „Solange Salat im Wasser liegt, bleibt er knackig. Erst in der Salatsauce fällt er zusammen, weil die Ionenkonzentration im Essig höher ist als im Salatblatt." Um ein Gleichgewicht der Konzentration zu erreichen, sickert

Fotos: Bernd Schuller (2)

Mini-Emulsionsprozess



Eine Rezeptur für gefüllte Kunststoffpartikel: Die ölige Phase I enthält die Ausgangsstoffe für das Polymer und die Substanzen, die verpackt werden. Ultraschall verwandelt sie in Nanotröpfchen, die eingehüllt vom Tensid in der wässrigen Phase II schweben. In einer chemischen Reaktion entsteht dann das Polymer.

Wasser aus dem Blatt. Ähnliches geschähe in einer Mini-Emulsion, wenn sich das osmotische Reagenz in einem schrumpfenden Bläschen konzentrieren würde, während es sich in einem wachsenden verdünnte. Daher findet die Ostwald-Reifung ein Ende, ehe sie richtig begonnen hat.

„Nachdem das klar war, konnten wir Mini-Emulsionen mit den Ausgangsstoffen für viele verschiedene Reaktionen herstellen“, sagt Landfester. Der Fantasie für chemische Nanotüfteleien waren nun kaum noch Grenzen gesetzt, denn die Mini-Emulsionen liefern fast alles, was die Kunststoffindustrie zu bieten hat: Polyacrylate, die etwa in Acrylglas Verwendung finden, Polyurethane, die als Schaumstoffe Häuser dämmen, Polyester, Nylon oder biologisch abbaubare Polymere wie Stärke und sogar halbleitende Polymere.

Züchten die Forscher Nanokugeln aus zwei Kunststoffen, die sich nicht mischen, bilden sich sogar Janus-Partikel mit zwei Polymergesichtern. „Solche Nanoteilchen können einer Beschichtung zwei Eigenschaften geben“, erklärt Anna Musyanovych. Oder sie kombinieren zwei halbleitende Polymere für eine Solarzelle.

Die Vielfalt der Polymere, die sich nun in den Mini-Emulsionen erzeugen ließ, nutzten die Chemiker um Katharina Landfester nun, um zum Beispiel Farbpigmente wie Rußpartikel zu verpacken. „Die mischen wir mit den Komponenten des Kunststoffs in die ölige Flüssigkeit“, erklärt Anna Musyanovych. Anschließend stoßen die Forscher die Bildung des Polymers an, das die Pigmente wie von selbst ummantelt. Einige Hersteller von Druckerfarbe verhindern auf diese Weise bereits, dass die Pigmente verklumpen. Ihre Tinten liefern daher besser aufgelöste Bilder, die zudem nicht verschmieren.

„Dann dachten wir: Wenn das mit Pigmenten funktioniert, müsste es doch eigentlich auch mit Magnetit gehen“, so Landfester. Nanoteilchen des eisenhaltigen und daher magnetischen Magnetits muss ein Patient als Kontrastmittel gespritzt bekommen, bevor ein

KUNSTSTOFF-TEILCHEN IM ELEKTRONENSTRAHL

Um Gestalt und Größe polymerer Nanopartikel und -kapseln zu bestimmen, eignen sich Elektronenmikroskope, die sich vor allem bei metallischen, keramischen und biologischen Strukturen schon lange bewähren. Sie zeigen auch, ob aus den Oberflächen der Partikel etwa tarnende Molekülketten herausragen. Zum einen nutzen die Mainzer Polymerforscher drei Transmissions-Elektronenmikroskope (TEM), die die Probe mit einem Elektronenstrahl durchleuchten und damit auch Information über die innere Struktur der Nanoteilchen liefern, etwa über die Wandstärke von Kapseln. Zum anderen verwenden sie zwei Raster-Elektronenmikroskope (REM), in denen der Elektronenstrahl die Oberfläche der Probe abtastet und damit ein topographisches Bild erzeugt.

Integrierte Röntgenfluoreszenz- und Elektronenenergieverlust-Spektrometer geben zudem Aufschluss über die Verteilung von Elementen in den Nanopartikeln.

Polymerkugeln im Elektronenstrahl zu studieren ist jedoch schwierig, da dieser die Polymere mehr oder weniger schnell zerstört. Das Mikroskopie-Team um Ingo Lieberwirth ist weltweit eine der wenigen Gruppen, die sich auf die Mikroskopie weicher Materie spezialisiert haben. Hierfür drosseln sie den Elektronenstrahl auf eine extrem geringe Intensität. Darüber hinaus fixieren sie die Polymere so, dass sie dem Elektronenstrahl länger standhalten.

Zwei Nachteile aber bleiben: Elektronenmikroskope liefern nur Bilder weniger Partikel. Zudem müssen die Teilchen getrocknet oder in ihrer Dispersion eingefroren werden. Um die Teilchen in ihrem natürlichen Medium zu beobachten, müssen die Mainzer Forscher weitere Methoden einsetzen (s. Kasten S. 64). So arbeitet die Mikroskopie-Gruppe daran, hochauflösende Laser-Scanning Mikroskopie (STED) auf Polymere anzuwenden.

Grafik: Designergold nach einer Vorlage des MPI für Polymerforschung



Je kleiner der Gegenstand, desto größer das Mikroskop: Ingo Lieberwirth untersucht Nanoteilchen mit einem mehrere Meter hohen Transmissions-Elektronen-Mikroskop, das eine Probe mit einem Elektronenstrahl durchleuchtet.

Arzt im Kernspintomografen etwa seine Leber untersucht. Da pure Magnetit-Partikel im Wasser und somit auch im Blut nicht stabil sind und sich zudem auflösen können, brauchen sie eine schützende Hülle.

Sie in einer Mini-Emulsion zu verpacken, bietet die Chance, die Teilchen als magnetische Sonden für unterschiedliche Gewebearten und Tumore in den Körper zu schicken. Zu diesem Zweck müssen die Mainzer Chemiker die Nanopartikel mit Antikörpern ausrüsten, die zugleich wie Adressschildchen, Anker und Türöffner für bestimmte Körperzellen wirken. Also hüllen sie das Kontrastmittel in einen Polymermantel, aus dessen Oberfläche chemische Halterungen herausragen. Daran lassen sich dann die Antikörper heften.

EINE SCHICHT, DIE TEILCHEN WASSERSCHEU MACHT

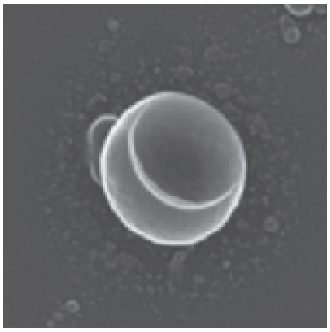
Damit die Wachtposten des Immunsystems die fremdartigen Partikel nicht schon auf dem Weg zu ihren Zielzellen aus der Blutbahn fischen, brauchen die verpackten Magnetit-Teilchen außerdem eine Tarnung. Auch dafür finden die Forscher ein geeignetes Material im Bauchladen der Polymere: Polyethylenglykol, kurz PEG, das die Immunabwehr nicht alarmiert. In die Mixtur der Magnetit-Verpackung rühren die Forscher nun auch Komponenten mit PEG-Anhängseln. Die fertigen Teilchen tragen dann nicht nur Halterungen für die biochemischen Adressschildchen, sondern auch tarnende PEG-Fäden.

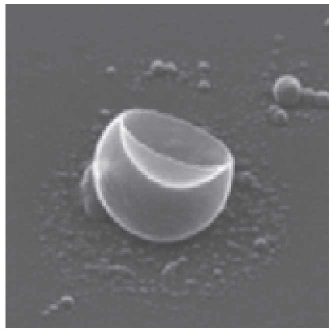
Mit der Idee einer ausgeklügelten, multifunktionellen Verpackung für die Magnetit-Teilchen gibt es nur ein Problem: Die Partikel sperren sich erst einmal gegen jegliche Form von Plastik-

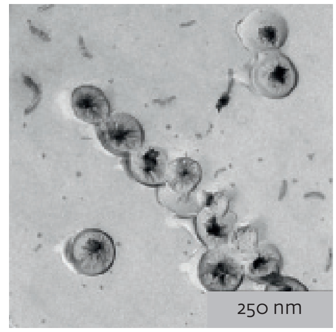
BLICK AUF NANOPARTIKEL IM WASSERBAD

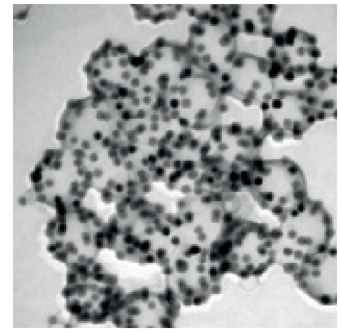
Egal ob Wand- oder Druckerfarbe, Arznei- oder Kontrastmittel – in der Praxis werden Nanopartikel meistens als Dispersion eingesetzt. Ihre Größe und Form im flüssigen Medium kann unter anderem mit verschiedenen Methoden der Lichtstreuung enthüllt werden. Dafür sind die Wissenschaftler der Analytik-Gruppe um Anja Kröger-Brinkmann Spezialisten. Die Verfahren beruhen darauf, eine Dispersion der Nanoteilchen mit einem Laserstrahl zu durchleuchten. Dabei streuen die Nanoteilchen das Licht. Die Intensität und Richtung des gestreuten Lichts hängt von der Gestalt und Größe der Teilchen ab. Über Letztere lassen sich etwa mit der dynamischen Lichtstreuung zuverlässige Aussagen treffen. Dabei analysieren die Forscher, wie stark das Bild des gestreuten Lichts, das an den Schnee auf einem gestörten Fernsehbild erinnert, flimmert. Das hängt von der Brown'schen Bewegung der Teilchen ab, und die wiederum von der Größe. Wenn die Forscher das Streulicht analysieren, das in Richtung großer Winkel abgelenkt wird, kann ihnen diese Technik auch etwas über die innere Struktur der Nanopartikel verraten. Zu diesem Zweck entwickeln sie die Methode derzeit weiter. Liegen in einer Dispersion Gemische unterschiedlich großer Partikel vor, so müssen die Teilchen zunächst getrennt oder sortiert werden, damit zuverlässige Aussagen über ihre Größenverteilung getroffen werden können. Dafür nutzen die Forscher unter anderem die Fluss-Feld-Fluss-Fraktionierung: Sie pumpen eine Dispersion des Teilchengemischs durch einen Kanal. Im rechten Winkel dazu trifft eine zweite Strömung, der Querfluss, auf die Kanalströmung. Diese Strömung drängt die größeren Teilchen stärker zur Kanalwand als die kleineren. Unter Einfluss dieses Kraftfeldes und der entgegenwirkenden Diffusion trennen sich die unterschiedlich großen Teilchen. Die so sortierten Teilchen lassen sich anschließend wiederum etwa mit Lichtstreumethoden analysieren.

Foto: Bernd Schuller









links | Kapseln mit Öffner: In die Polymerhüllen dieser Nanocontainer haben die Mainzer Forscher chemische Bausteine integriert, die bei einer Temperaturerhöhung als gasförmiger Stickstoff entweichen. Die Kapsel bekommt Löcher.

rechts | Einzeln oder im Sammelbehältnis lassen sich feste anorganische Teilchen verpacken – je nachdem, ob sie als Farbe, Beschichtung oder Kontrastmittel in der Medizin dienen. Manchmal müssen die Partikel allerdings mit chemischen Tricks hineingeschmuggelt werden.

mantel. Wenn Anna Musyanovych sie nämlich mit Öl, Wasser und den anderen Komponenten zusammenmischen würde, schwämmen sie anschließend ausschließlich im wässrigen Teil und nicht in den Öltröpfchen: Magnetit zieht Wasser als Aufenthaltsort eindeutig vor. „Daher müssen wir die Magnetit-Teilchen hydrophobisieren", sagt Anna Musyanovych. Die Chemikerin verkehrt die Vorliebe für eine wässrige Umgebung also in eine Vorliebe für eine ölige Nachbarschaft, indem sie zunächst einen Ölsäurefilm um die Magnetit-Teilchen legt und anschließend in die Multifunktionshülle einpackt.

Wenn sich die Nanopartikel gezielt zu bestimmten Zellen schicken lassen, liegt es nahe, sie auch als Fähren für Medikamente einzusetzen. Doch Wirkstoffe, die in festen Kunststoff-Kügelchen eingeschweißt sind, helfen da nicht weiter. Sie sollten ihre Wirkungsstätte am besten flüssig erreichen. Auch einige Kontrastmittel für Untersuchungen im Kernspintomografen gibt es nur in flüssiger Form. „Unser nächster Gedanke war also, eine Flüssigkeit zu verkapseln", sagt Katharina Landfester. Und zwar möglichst eine wässrige. Denn der Kapselinhalt mit einem gelösten Wirkstoff soll sich schließlich mit dem wässrigen Medium des Zellinneren mischen.

Um Polymere in Wassertröpfchen zu erzeugen, hatten die Forscher zu diesem Zeitpunkt schon eine Lösung parat: die inverse Mini-Emulsion. Sie besteht hauptsächlich aus Öl, in dem Wassertröpfchen schweben. Nun müssen sich die Ausgangsstoffe der Kunststoffe, die sich in den Tröpfchen bilden, in Wasser statt Öl lösen. Auch von diesen Stoffen gibt es reichlich.

ORDNUNGSHILFE FÜR DEN BAU VON DATENSPEICHERN

Wenn die Chemiker ein Wassertröpfchen mit einer festen Hülle versehen wollen, hilft ihnen zudem, dass sich viele Polymere als feste Teilchen aus der Flüssigkeit absetzen, sobald sie sich bilden. Meistens aber nicht am Tröpfchenrand, sondern als winzige Polymerkörnchen im Inneren der Flüssigkeitsbläschen. Doch auch hier hilft die Vielfalt der Chemie: Manche Polymere entstehen aus einer Komponente, die sich in der wässrigen Flüssigkeit löst, und einer, die eine ölige Umgebung vorzieht. Zum Kettenmolekül finden beide nur an der Grenze der Flüssigkeiten zusammen, nämlich am Tröpfchenrand. So bildet das wachsende Polymer wie von selbst eine Kapsel.

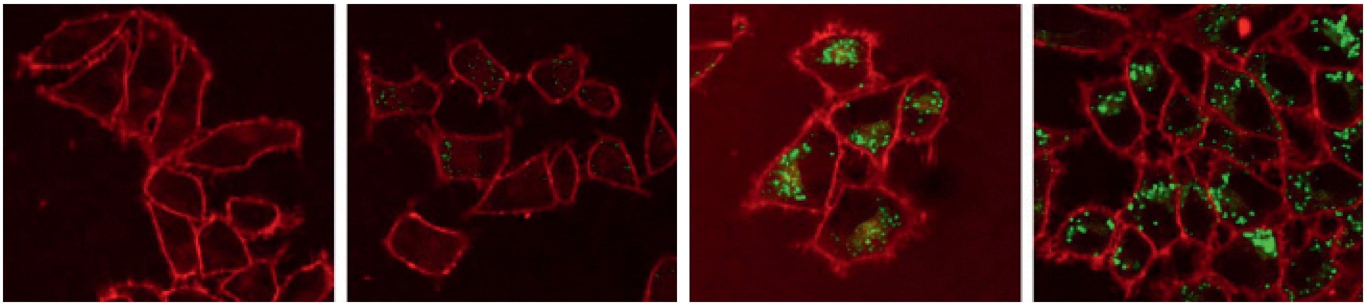
Mit dieser Kapsel lässt sich ein Wirkstoff also etwa in eine Tumorzelle schleusen – fehlt nur noch der Öffner, um das Mittel freizusetzen. Aber natürlich bietet die Chemie auch für dieses Problem eine Lösung. Mehrere sogar, je nachdem ob sich die Kapsel durch eine erhöhte Temperatur, veränderte Säure-Base-Eigenschaften des Milieus, Enzyme oder UV-Licht öffnen lassen soll. Die Chemiker um Katharina Landfester bauen in die Kunststoffkapseln einfach chemische Sollbruchstellen ein, die den Inhalt freigeben, wenn der passende Mechanismus die Kapsel durchlöchert.

Bislang verlief die Entwicklung der Zauberkugeln ziemlich planmäßig. „Meistens haben alle Schritte so oder so ähnlich funktioniert, wie wir uns das vorher überlegt hatten", sagt Katharina Landfester. Nur einmal sah es fast so aus, als würde ein Projekt scheitern. „Wir wollten mit Nanopartikeln Nanolithografie betreiben", erklärt die Forscherin. Mit Nanokapseln versuchten die Chemiker Nanohäufchen eines Metallsalzes auf einer Unterlage zu erzeugen, und zwar in einem regelmäßigen Muster, das sich von selbst bildet. Solche Salzkörnchen lassen sich in Metallpunkte verwandeln, die als Datenspeicher dienen könnten.

Doch die Teilchen zeigten erst einmal keinen ausgeprägten Ordnungssinn: „Wir haben zunächst Nanokapseln mit der Lösung eines Metallsalzes geformt", so Landfester. Die Kapseln ließen sich zwar schön regelmäßig auf einer Unterlage nieder. Sobald die Forscher sie aber austrockneten, setzten sich die Salzhäufchen nicht in einem ordentlichen Muster ab.

So endete auch der Versuch, Salzkörner in Kunststoff einzuschweißen, die gefüllten Kugeln auf der Oberfläche zu verteilen und das Polymer anschließend mit einem Plasmastrahl wegzuätzen. „Zuerst hat nichts von dem geklappt, was wir ausprobiert haben", klagt die Chemikerin. Dann aber haben die Forscher das Salz in dem Kunststoff gelöst. Wenn sie nun das Polymer mit

Fotos: MPI für Polymerforschung (4)



Viele Schlüssel, leichter Zutritt: Je mehr funktionelle Gruppen die fluoreszierenden Nanopartikel tragen, desto leichter verschaffen sie sich Zugang zu den Zellen. Von links nach rechts steigt ihr Anteil in der Hülle von null auf zehn Prozent.

dem Plasmastrahl abtrugen, zogen sich die Kugeln wie schrumpfende Luftballons zusammen, bis schließlich – genau in ihrer Mitte – die Salzpunkte zurückblieben. Deren Größe steuern die Chemiker nun über die Salzmenge im Polymer, den Abstand über die Größe der Polymerkugeln.

So können die Chemiker inzwischen je nach Zweck alle möglichen Kapseln und Teilchen basteln. Einfache Kapseln könnten in einem Wachmittel langsam Parfüm freisetzen oder in Zahnpasta Biominerale, die defekten Zahnschmelz regenerieren.

GIFTIGE POSTPAKETE FÜR TUMORZELLEN

Komplizierter gebaute Nanokapseln haben die Mainzer Chemiker für Mediziner der Uniklinik in Ulm präpariert. Sie könnten helfen, geschädigtes Gewebe zu heilen. Die Nanokapseln enthalten Substanzen, die Stammzellen zur Differenzierung anregen. Stammzellen und Nanokapseln schleusen die Mediziner in das kranke Gewebe. Dort bringt die Fracht der Nanovehikel die Stammzellen dazu, gesundes Herzgewebe zu bilden. Für dasselbe Projekt haben die Mainzer Chemiker auch fluoreszierende Substanzen und magnetische Kontrastmittel in Nanopartikel gepackt, die in die Stammzellen eindringen. Die Teilchen zeigen den Ulmer Ärzten unter geeigneten Mikroskopen beziehungsweise im Kernspintomgrafen, welche Wege die Stammzellen im Gewebe nehmen.

Für Biotechnologen der Universität Stuttgart hat das Team von Katharina Landfester einen Wirkstoff-Container konstruiert, der aufgebaut ist wie eine Haselnuss und Brusttumore bekämpfen könnte. Den Kern bildet ein Nanoteilchen, dessen Oberfläche mit einem starken Gift überzogen ist. Damit es nur den Tumor, diesen dafür aber umso heftiger attackiert, verkapseln die Chemiker den Kern und adressieren die giftige Sendung mit passenden Antikörpern an die Krebszellen. Gesunde Zellen verschont das Gift dagegen weitgehend. Zu einem marktreifen Medikament müsste die Pharmaindustrie die Wirkstoff-Container weiterentwickeln. „Meines Erachtens hat da in den vergangenen Jahren aber die Risikobereitschaft abgenommen, Ansätze zu verfolgen, die sich noch im Stadium der Grundlagenforschung befinden“, sagt Katharina Landfester.

Vielleicht finden Teilchen mehrerer Kapseln auch in der Gentechnik oder gar der Gentherapie Anwendung. Solche Partikel könnten nämlich als Vehikel für DNA oder RNA dienen. Die äußere Hülle könnte den Türöffner für die Zelle tragen, die innere den Partikeln Zugang zum Kern verschaffen. Wie sich Gene am geschicktesten ins Erbgut schleusen lassen, untersuchen die Kolloidforscher gemeinsam mit Forschern der Universität Mainz. Derzeit prüfen sie, wie die Oberflächen der Teilchen beschaffen sein müssen, damit diese in den Kern eindringen.

Ein ähnliches Problem beschäftigt sie auch bei dem Versuch, Nanopartikel durch die Blut-Hirn-Schranke zu schmuggeln. Diese physiologische Barriere schützt das zentrale Nervensystem vor Eindringlingen und verwehrt auch den meisten Arzneimitteln den Weg. Daher scheitern viele potenzielle Medikamente gegen Erkrankungen der Nerven an ihr. Nun drehen die Mainzer Polymerforscher an allen möglichen Stellschrauben, um ihren Partikeln eine Zutrittsberechtigung zum Gehirn zu verschaffen. Katharina Landfester vermutet, dass auch hier die Oberflächen der Partikel entscheidend sind.

„Ich glaube allerdings, wir müssen uns noch einmal genau die chemischen Details der Blut-Hirn-Schranke anschauen“, sagt sie. Mediziner hätten bislang zu sehr das System als Ganzes im Blick gehabt. Sie will sich diesem Problem deshalb mit demselben Blick nähern, der ihr schon das Potenzial der Mini-Emulsionen offenbart hat – dem Blick der Kolloid-Chemikerin nämlich. ◂

GLOSSAR

Mini-Emulsion
Ein Gemisch von Öl und Wasser, wobei Tröpfchen der einen Flüssigkeit fein verteilt in der anderen schweben. Im Gegensatz zur herkömmlichen Emulsion werden die Tröpfchen mit Ultraschall zu ziemlich einheitlicher Größe im Nanomaßstab zerrissen. Zudem wird die Mini-Emulsion durch das osmotische Reagenz stabilisiert: eine Substanz, die fast nur in den Tröpfchen löslich ist und verhindert, dass die größeren Tröpfchen auf Kosten der kleineren wachsen.

Polymere
Darunter fallen alle Kunststoffe. Sie bestehen aus ketten- oder netzförmigen Molekülen, die sich aus Bausteinen eines Monomers, manchmal auch verschiedener Monomere, zusammensetzen. Sie werden nach Ausgangsstoffen und Art ihrer Verkettung unterschieden.

Tensid
Stoff, dessen Moleküle ein wasserlösliches und ein öllösliches Ende aufweisen.

Polyethylenglykol
besitzt eine sehr geringe Toxizität und wird als Wirkstoffträger in der Medizin eingesetzt.

Fotos: MPI für Polymerforschung (4)



Im Foyer des Max-Planck-Instituts für Metallforschung radelt Sylvie Roke nur zu Demonstrationszwecken, doch im bergigen Ländle um Stuttgart unternimmt sie gern eine Tour.

Tiefgang an Oberflächen

Im ersten Anlauf klappten die Experimente für ihre Promotion nicht richtig. Im zweiten eröffnete **Sylvie Roke** eine völlig neue Sicht auf weiche Materie. Am **Max-Planck-Institut für Metallforschung** untersucht sie mit der Methode auch neue Medikamente und biologische Zellen.

EIN PORTRÄT VON **UTA DEFFKE**

Manchmal sind es die kleinen, alltäglichen Dinge, die noch große Geheimnisse bergen. Man nehme zum Beispiel Öl und kippe es in ein Gefäß mit Wasser. Beide Flüssigkeiten werden sich nicht vermischen, das kennt jeder von der Vinaigrette aus Essig und Öl. Erst kräftiges Schütteln verteilt das oben schwimmende Öl im Wasser. Allerdings nur in Form feiner Tröpfchen. Chemiker nennen das eine Emulsion. Es gibt sie überall im täglichen Leben: als Milch, Butter, Shampoo oder Medizin. Doch was bestimmt die Größe der Tröpfchen, ihre Stabilität, ihre Wechselwirkung mit der umgebenden Flüssigkeit? Warum ändert sich das alles, wenn man bestimmte Substanzen dazu gibt? Und wie lässt sich das gezielt beeinflussen?

Die Antworten auf diese Fragen liegen in der Oberfläche der Teilchen verborgen. Sylvie Roke zeichnet einen schwarzen Kreis auf die weiße Tafel und drum herum noch einen. „Diese Grenzschicht ist nur etwa einen Nanometer dick, aber sie unterscheidet sich grundlegend vom Rest der Flüssigkeit“, erläutert die Physikerin. Die Flüssigkeit verhält sich dort eher zähflüssig und enthält viel mehr geladene Teilchen, die untereinander und auf ihre Umgebung eine anziehende oder abstoßende Wirkung ausüben. Doch wie sehen die Moleküle dort genau aus? Wie sind sie angeordnet und warum? Ist das bei der gekrümmten Oberfläche der Tröpfchen anders als bei der glatten Oberfläche vorher?

AN LEHRBUCHWISSEN ZU RÜTTELN MACHT SPASS

Erste Spekulationen darüber geisterten schon vor hundert Jahren durch die Fachliteratur. „Über die Tröpfchen gibt es eine Menge Theorien“, sagt Roke, „aber bislang gibt es dazu keine direkten Messungen.“ Es gab schlichtweg keine geeignete Methode, die den Forschern Zugang zu den Grenzflächen der winzigen Tröpfchen ermöglicht hätte. Sylvie Roke hat ein optisches Verfahren entwickelt, mit dem das nun erstmals möglich ist. „Damit können wir eine Menge alter Vorstellungen über Bord werfen“, sagt sie. „Das macht natürlich Spaß; andererseits ist es ziemlich hart, gegen Lehrbuchwissen anzuforschen, denn da werden wir natürlich besonders kritisch beäugt.“

Trotz ihrer zierlichen Erscheinung und ihren gerade einmal 32 Lebensjahren klingt es nicht so, als ließe sich Sylvie Roke davon einschüchtern. Im Gegenteil. Die junge Wissenschaftlerin liebt solche Herausforderungen und weiß, was sie kann und was sie will. Wenn sie über ihre Arbeit und ihre Pläne spricht, haut sie schon mal mit den Händen auf den Tisch, demonstriert mit einer Spiralfeder die Bewegung von Molekülen und skizziert Formeln an die Tafel. Und sie beweist durchaus komödiantisches Talent beim Erzählen, wenn sie in Tonfall und Mimik andere Leute imitiert.

Sylvie Roke sitzt in ihrem Büro im sechsten Stock eines Neubaus, draußen vor den Toren Stuttgarts. Gläserne Fassade, Beton im Kern – das Max-Planck-Institut für Metallforschung. Seit 2005 leitet sie hier ihre eigene, themenoffene Max-Planck-Forschungsgruppe, die inzwischen sieben Wissenschaftler aus Brasilien, Spanien, USA, Frankreich, Holland und Deutschland umfasst. Man frage sie oft, warum sie ausgerechnet an ein Institut für Metallforschung gekommen sei. Doch der Name ist historisch bedingt. Hinter den Büro- und Labortüren geht es längst um ein brei-

Foto: Frank Vinken

» Die gekrümmten Oberflächen kleiner Partikel streuen das Licht in verschiedene Richtungen. Dass man die Streueffekte gezielt ausnutzen kann, um Erkenntnisse über Größe und Form der Partikel zu gewinnen, darin liegt die Idee, die Sylvie Roke verfolgt.

tes Spektrum an Stoffen und Themen. Und die weiche Materie, die weder eindeutig festen noch flüssigen Stoffen zuzuordnen ist, liegt auch hier im Trend – inklusive biologischer Materialien.

Grenzflächen spielen für viele Prozesse eine Schlüsselrolle. Sie bestimmen die elektronischen Eigenschaften von Computerchips und die mechanische Stabilität von festen Körpern. Sie beeinflussen Transportvorgänge durch Zellwände, zum Beispiel bei Medikamentengabe, und die Wechselwirkung von Partikeln mit ihrer Umgebung. Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Nanomaterialien basieren sogar nahezu ausschließlich auf den Eigenschaften der Oberflächen. Denn je kleiner die Abmessungen eines Körpers werden, desto dominanter wird der Anteil seiner Oberfläche und umso wichtiger wird es, sie zu verstehen.

ZELLHÜLLEN UND TRÖPFCHEN IN NEUEM LICHT

Um ebene Oberflächen zu untersuchen, gibt es einige etablierte Verfahren: von der Elektronenstreuung bis hin zu laseroptischen Methoden. Sie haben entscheidend zur steten Miniaturisierung der Mikroelektronik beigetragen. Allerdings eignen sich diese Techniken nur bedingt, um die Oberflächen weicher Materie wie Zellen oder Emulsionen zu untersuchen. Es gibt gleich mehrere Haken: Etliche der Methoden benötigen Vakuumbedingungen, unter denen Flüssigkeiten sofort verdampfen; und die interessanten Oberflächen sind in Flüssigkeiten oder festen Körpern regelrecht verborgen, sodass Elektronen gar nicht bis dorthin gelangen. Außerdem sind die Partikel sehr klein und ihre Oberflächen daher krumm, sodass unkontrollierte Streueffekte auftreten.

Das vielversprechendste Instrument, um weiche Materie zu erforschen, ist Licht. Denn es kann Flüssigkeiten und feste Körper durchdringen. Zudem wird Licht bereits verwendet, um Oberflächenstrukturen zu untersuchen, und zwar in einer nicht-linearen Methode der Schwingungs-Spektroskopie: Sie verrät, verkürzt gesprochen, wie die Moleküle an Oberflächen vibrieren, woraus sich wiederum ihre Struktur ableiten lässt.

Doch die ausgeklügelte Methode funktioniert in dieser Form nur an glatten Oberflächen. Denn zur Analyse benötigt man einen Lichtstrahl, der wie von einem Spiegel direkt reflektiert wird. Die gekrümmten Oberflächen kleiner Partikel streuen das Licht aber in verschiedene Richtungen, wo es nur noch in geringer Intensität ankommt. Dass man dennoch die Informationen über die Oberflächenmoleküle daraus ablesen und die Streueffekte sogar gezielt ausnutzen kann, um Erkenntnisse zum Beispiel über Größe und Form der untersuchten Partikel zu gewinnen, darin liegt die Idee, die Sylvie Roke verfolgt.

Um die nicht-lineare Streuspektroskopie zu realisieren, braucht sie ein fundiertes Wissen über die Streuprozesse an den Teilchen. Nur so lassen sich die Daten richtig interpretieren. Im Labor sind auf einem großen Tisch Laser aufgebaut und viele Spiegel und Linsen, die den Lichtstrahl formen. Ultrakurze intensive Lichtblitze sind nötig, damit die Schwingungen der Oberflächenmoleküle überhaupt ausreichend starke Signale erzeugen. Und weil sie so kurz sind, eignen sie sich auch, um den zeitlichen Verlauf der angeregten Molekülschwingungen in einer raschen Folge von Schnappschüssen zu beobachten.

BEDEUTENDE PREISE NACH DEN ERSTEN PUBLIKATIONEN

Mit diesem Verfahren haben die Forscher um Sylvie Roke unter anderem nachgewiesen, dass eine Suspension von Kolloiden – kleine Kügelchen in einer Flüssigkeit – eine gelartige Konsistenz annimmt, wenn sich die Molekülketten, die wie Haare an der Kolloidoberfläche sitzen, abwechselnd mit Flüssigkeitsmolekülen anordnen. Die Molekülhaare beeinflussen somit die Eigenschaften des Materials, in diesem Fall des Gels. Die Forscher bewiesen zudem: Die Oberfläche der Öltröpfchen in Wasser unterscheidet sich grundlegend von der Grenzfläche, die Flüssigkeiten trennt, wenn sie in Schichten übereinander schwimmen. Darüber hinaus arbeiten die Max-Planck-Wissenschaftler permanent daran, die Empfindlichkeit ihrer Apparatur weiter zu steigern und neue optische Effekte zu integrieren.

Für ihre Entwicklung wurde Sylvie Roke 2008 mit dem Hertha-Sponer-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft ausgezeichnet. Und bereits 2006 bekam sie den holländischen Minerva-Preijs, der ebenfalls speziell Wissenschaftlerinnen ehrt. „Das ist schon etwas Besonderes für mich“, sagt Roke nicht ohne Stolz. „Manche Forscherin ist damit für ihr





Wenn Sylvie Roke die nicht-lineare Streuspektroskopie erklärt, nimmt sie ihre Hände, einfache Modelle und natürlich eine Tafel zu Hilfe: Die von ihr entwickelte Methode liefert zum einen Information der Schwingungsspektroskopie über die Oberflächen von Zellen und Emulsionströpfchen. Die Streuung des Lichts offenbart zum anderen Größe und Form der Partikel.

Fotos: Frank Vinken (2)

Lebenswerk ausgezeichnet worden, und ich bekam ihn bereits nach meinen ersten Veröffentlichungen.“

Ziemlich eilig hatte es Sylvie Roke schon ganz am Anfang ihres Lebens. Ein bisschen zu eilig vielleicht. Denn sie wurde drei Monate zu früh geboren und musste erst einmal um ihr Überleben kämpfen. Auch später noch war sie mehr als andere Kinder mit dem Groß-und-stark-Werden beschäftigt. Zum Glück hatte sie ihre um ein Jahr ältere Schwester. „Sie war immer größer und besser als ich. Aber sie nahm mich trotzdem mit. Weil sie Fußball spielen wollte, musste ich das auch lernen. Wenn sie wollte, dass wir durch den Wald rennen, dann rannte ich mit. Und wenn sie auf Bäume klettern wollte, kletterten wir auf Bäume. Sie ließ nicht locker, und das war sehr wichtig für mich.“

Irgendwann, mit 15 oder 16, war Sylvie Roke in ihrem eigenen Leben angekommen. Und da begann sie sich auch für die Naturwissenschaften zu interessieren. Mathematik erschien ihr als sehr natürliche Art zu denken, und auch Physik und Chemie fielen ihr leicht. Sie begann in Fachzeitschriften zu lesen und fand Gefallen an der Idee, so etwas später selbst zu machen. Damit hatte sie – auch in der Familie – ihre Nische gefunden. Denn die Eltern arbeiten beide als Juristen. Und die Schwester? „Sie ist Psychiaterin geworden und mehr für das Soziale zuständig“, sagt Roke mit einem Augenzwinkern.

An der Universität in Utrecht, nahe ihrem kleinen Heimatort, begann sie ein Chemiestudium. Doch als sie in den Veranstaltungen des Vordiploms wieder und wieder mit ihren Fragen nach dem „Warum“ nervte, empfahl ihr ein Dozent schlichtweg, sie solle doch lieber zur Physik wechseln. Das tat sie dann auch. Nach weiteren zweieinhalb Jahren beendete Roke dann nicht nur das Physik-, sondern auch noch das Chemiestudium. In der Masterarbeit am Amsterdamer Institut für Atom- und Molekularphysik vertiefte sie sich erstmals in die Untersuchung von Oberflächen – ein klassisches Grenzgebiet zwischen Physik und Chemie. Als die Arbeitsgruppe dann an die Universität Leiden umzog und sich die Möglichkeit bot, in die Laserphysik einzusteigen, ging Roke mit, um ihre Doktorarbeit zu schreiben.

Allerdings lief das anfangs nicht rund, die Experimente wollten nicht klappen. Sylvie Roke geriet ins Grübeln und konstatierte drei mögliche Ursachen: „Erstens: Ich bin eine lausige Wissenschaftlerin; oder zweitens: Die ganze Idee ist falsch; oder drittens: Es liegt

» Der umfassende Blick auf eine Sache war ihr selbst schon im Studium wichtig. Deshalb hat sie damals an der „Universiteit Vrij van Nut" teilgenommen, der „Universität ohne Nutzen".



Zum Schlittschuhlaufen hat die Holländerin nur selten Gelegenheit, aber mit Inline-Skates kann sie dafür auch ohne Eis trainieren.

am schlechten Signal-zu-Rausch-Verhältnis." Um herauszufinden, ob die einzig wirklich beunruhigende Hypothese Nummer eins stimmte oder nicht, beschloss sie, einfach ein neues Projekt anzugehen. Und sie hatte auch schon eines im Kopf.

„WENN MAN ETWAS WILL, GIBT ES IMMER WEGE"

Zu Beginn ihrer Promotion verbrachte sie einige Wochen an der Columbia University in New York. Aus dieser Zeit kannte sie Leute, die nicht-lineare Optik im sichtbaren Spektrum mit Lichtstreuung kombinierten. Warum also die Lichtstreuung nicht mit Spektroskopie im infraroten Bereich verbinden, der für die Aufklärung von Molekülstrukturen besonders gut geeignet ist?

Innerhalb weniger Monate baute sie nach dieser Idee ein Lasersystem. Und zeigte, dass es damit prinzipiell möglich war, die Oberflächeneigenschaften von Partikeln zu bestimmen. „Da habe ich eine Menge Glück gehabt", sagt sie. „Denn meine Testpartikel hatten genau die richtige Größe, dass ich sie relativ problemlos messen konnte."

So hatte sie also ihre Wissenschaftlerinnen-Ehre vor sich selbst wiederhergestellt und nach erfolgreicher Promotion zog es sie für eine Postdoc-Stelle ins Ausland. „Wie das so ist: Ich traf Michael Grunze auf einer Konferenz. Wir haben uns nett unterhalten, er hatte eine interessante Stelle in der physikalischen Chemie und so landete ich mit einem Alexander-von-Humboldt-Stipendium in Heidelberg." Der gastgebende Professor machte sie allerdings auch auf das Programm der Max-Planck-Nachwuchsgruppen aufmerksam und ermunterte die junge Forscherin, sich dafür zu bewerben.

Wirklich viel habe sie damals nicht gewusst über die Max-Planck-Gesellschaft und ihre Möglichkeiten, gesteht Sylvie Roke. Noch in Heidelberg hatte sie allerdings Joachim Spatz kennengelernt, der auf dem Sprung war ans Max-Planck-Institut für Metallforschung. Er beschäftigte sich ebenfalls mit Oberflächen und Nanostrukturen und mit biologischen Materialien und riet ihr, sich auch dort zu bewerben. Mit Erfolg: Ihre Idee und die ersten Ergebnisse ihrer neuen Methode überzeugten nicht nur die Juroren der Max-Planck-Gesellschaft, sondern auch das Direktorium in Stuttgart.

Nicht nur in wissenschaftlicher Hinsicht bot sich ihr damit eine glänzende Perspektive. Ihr Freund hatte sich bereit erklärt, von Holland nach Stuttgart zu kommen, wenn das mit der Nachwuchsgruppe klappen sollte. „Es ist für mich schon sehr wichtig, dass wir keine Fernbeziehung führen müssen", sagt Roke. „Ich weiß, dass das viele machen, aber ich könnte und wollte das nicht. Und wenn man etwas will, gibt es immer Wege ..."

Und wie ist es so als Holländerin in Deutschland? Noch dazu im Herzen des schon fast bergigen und in jedem Fall „vorbildlichen Ländle"? „Na ja", sie stöhnt ein bisschen, „es ist halt anders. Und daran muss man sich erst mal gewöhnen." Inzwischen ist ihr allerdings eher schon ihre Heimat fremd geworden: „Wenn ich jetzt nach Holland

Foto: Frank Vinken



komme, bin ich sehr oft irritiert und denke: Kann das nicht mal ‚normal' gehen? Eigentlich passe ich hier nicht mehr wirklich her." Der größte Unterschied sei wohl, dass die Deutschen doch sehr viel geregelter leben und sich an die Vorschriften auch halten: „Wenn da steht: ‚Fahrrad abstellen verboten' – dann steht da auch keins."

AUCH BEIM RADFAHREN EINE KÄMPFERNATUR

Dass Sylvie Roke aus Holland kommt, wird spätestens dann klar, wenn sie von ihren sportlichen Vorlieben spricht: Radfahren und Eisschnelllaufen. „Ich liebe die Geschwindigkeit auf dem Eis, es ist fast wie fliegen", schwärmt sie. Leider ist die Eishalle im benachbarten Kornwestheim im vorigen Jahr abgebrannt, und alternative Eisschnelllaufstrecken sind rar. Auch in Holland sind zugefrorene Grachten eher selten. Wenn dann allerdings die Menschen auf Kufen von Ort zu Ort ziehen und sich von der eisigen Landschaft und den fantastischen Perspektiven auf die alten Städte verzaubern lassen, sei das schon eine ganz besondere Atmosphäre und eine große nationale Party.

Zum Radfahren genießt Sylvie Roke das Stuttgarter Umland. „Ich fahre gerne bergauf", gesteht sie. Für die Kämpfernatur in ihr darf es auch schon mal ein Klassiker sein: Elfmal hat sie den Mont Ventoux bereits bezwungen, den berüchtigten kahlen Berg der Tour de France. Und wenn es draußen arg ungemütlich ist oder gerade kein ordentlicher Berg vor der Tür liegt, dann gibt es da noch den Hometrainer mit DVD und



Das erste Lasersystem baute die Physikerin während ihrer Doktorarbeit auf. Noch immer optimieren sie und ihre Mitarbeiter das Gerät.

Fotos: Frank Vinken (2)



Als Roke nach Stuttgart kam, spürte sie die Unterschiede zu Holland deutlich. Inzwischen ist ihr fast eher schon die Heimat fremd geworden.

Computer. „Da kann ich dann einfach Alpes d'Huez auflegen und die Anlage übersetzt mir das für Auge und Beine."

Auch beim Lesen ist die Physikerin neuester Technik nicht abgeneigt. Neben der Kaffeetasse greift sie beim Frühstück gerne zum E-Book-Reader. Es fühle sich an wie ein richtiges Buch und sei sehr praktisch, insbesondere auf Reisen könne man damit viel Gepäck sparen. Inhaltlich bevorzugt sie dagegen Historisches, zum Beispiel *Persian Fire* von Tom Holland über den Krieg der Perser gegen die Griechen. Besonders gelungen findet sie auch Bill Brysons *Eine kurze Geschichte von fast allem*. An diesem populärwissenschaftlichen Rundumschlag schätzt sie, dass die großen Zusammenhänge deutlich werden. Bryson liste nicht bloß chronologisch Entdeckungen auf. So werde er dem Lauf der Wissenschaft doch viel eher gerecht, findet Roke.

Der umfassende Blick auf eine Sache war ihr selbst schon im Studium wichtig. Deshalb hat sie damals an der „Universiteit Vrij van Nut" teilgenommen, der „Universität ohne Nutzen", die der Biologieprofessor Frits Bienfait ins Leben gerufen hatte. In vierzehntägigen Sommercamps ohne Fernseher und Computer trafen sich Studierende aller Fakultäten, um miteinander über diverse und kontroverse Themen zu diskutieren. Die Verantwortung des Boxers für sein Gehirn zum Beispiel. „Das waren sehr wichtige Erfahrungen für mich, Dinge so intensiv und aus den unterschiedlichsten Perspektiven zu betrachten", resümiert Roke.

Diesen ganzheitlichen Ansatz versucht sie auch in ihrer Max-Planck-Gruppe umzusetzen. Hier arbeiten Chemiker und Physiker gemeinsam, sowohl am Experiment als auch an den entsprechenden Theorien. Erst kürzlich haben sie eine vollständige Theorie zu ihrer Streumethode veröffentlicht, die sogenannte nicht-lineare Mie-Theorie. Damit können sie den Streuprozess an sphärischen Partikeln für jedes beliebige Medium beschreiben. Künftig wollen sie die Theorie auch auf andere Partikelformen ausdehnen. Die Theorie trägt entscheidend dazu bei, die Messergebnisse richtig zu interpretieren und auch den Versuchsaufbau weiter zu optimieren.

WICHTIGE HINWEISE FÜR KÜNFTIGE MEDIKAMENTE

Gerade abgeschlossen ist ein medizinisches Projekt mit der Universität Utrecht. „Ich traf den Forscher tatsächlich im Fahrstuhl, und er erzählte mir von seinem Problem", erinnert sich Sylvie Roke. Zur Bekämpfung von Leberkrebs hatten die Mediziner winzige Kügelchen aus biologisch abbaubarem Kunststoff entwickelt. Darin befinden sich geringe Mengen Holmium, das zum Aussenden radioaktiver Strahlung angeregt wird, um den Tumor zu zerstören. Die Mediziner hatten festgestellt, dass etwa die Hälfte der Kügelchen über die Blutbahn bis in den Tumor gelangt. Um die Therapie zu optimieren, wollten sie mehr über die Kunststoffpartikel erfahren: wo genau sich das Holmium in ihnen befindet und wie sie transportiert werden.

Von ihren Messergebnissen an den Partikeln waren die Max-Planck-Forscher zunächst irritiert. Die beobachteten Streuphänomene ließen sich durch die Oberflächen der Kunststoffkügelchen nicht erklären. Stattdessen deutete alles darauf hin, dass die Kunststoffmoleküle innerhalb der Kügelchen kristalline Bereiche bilden. Und in diesen Bereichen befindet sich auch das Holmium, aber in einer so stabilen Konfiguration, dass es auch nach einem stundenlangen Aktivierungsprozess nicht anfängt zu strahlen. Eine wichtige Erkenntnis für das Design künftiger Medikation, findet Sylvie Roke. „Es ist doch sehr befriedigend, wenn man etwas Grundlegendes herausfindet, das auch sehr nützlich ist, nicht wahr?" Mittlerweile werden die Holmium-Partikel in klinischen Studien erprobt.

Zurzeit ist Sylvie Roke nicht mehr so oft im Labor zu finden. Sie schreibt an Veröffentlichungen und kümmert sich

Foto: Frank Vinken

um die Zukunft. Darum, ihre Ideen und Ergebnisse auch in Vorträgen weiter publik zu machen. Denn noch ist ihre Gruppe weltweit die einzige, die sich auf diese Weise mit den Partikeloberflächen befasst. Und man trifft ja nicht alle, die das interessieren könnte, zufällig im Fahrstuhl.

Und die private Zukunft? Kinder sind jedenfalls nicht geplant, da ist sich Sylvie Roke mit ihrem Partner einig. „Ich bin gerne Tante und skype viel mit meinen Nichten. Aber Kinder brauchen eine Menge Energie, das sehe ich bei meiner Schwester. Was ich tue, macht mir großen Spaß. Eine solche Chance haben nicht viele, und ich denke, ich sollte sie auch nutzen.“

ARBEIT FÜR ZWANZIG JAHRE

Das nächste große Projekt hat jedenfalls schon begonnen: Für die Erforschung der Emulsionen hat sie 2009 einen der begehrten, mit 1,3 Millionen Euro dotierten ERC-Grants aus der EU-Forschungsförderung bekommen. Damit ist ihre Arbeit vorerst bis 2014 gesichert. Um die längerfristige Zukunft sorgt sich Sylvie Roke nicht: „Es war ein gewisses Risiko, hier mit meiner Idee zu starten.“ Aber jetzt, da die Methode läuft, können sie und ihre Mitarbeiter die kleinsten Strukturen von weicher Materie untersuchen und die Prozesse zeitlich sehr genau auflösen und so dazu beitragen, Materialien mit neuen Eigenschaften zu entwickeln. „Da gibt es so viele Fragen zu beantworten, dass wir damit sicher für die nächsten zwanzig Jahre beschäftigt sind. Dafür bietet die Max-Planck-Gesellschaft ideale Bedingungen.“ ◀

GLOSSAR

Weiche Materie
ist weder eindeutig fest noch flüssig. Sie kennzeichnet, dass kleine Temperaturänderungen in der Umgebung eines Systems große Veränderungen im System selbst hervorrufen. Zum Beispiel Milch: Ohne Kühlschrank wird sie schnell sauer. In festen Stoffen hat die damit verbundene Temperaturerhöhung keine derartigen Auswirkungen.

Kolloide
Teilchen oder Tröpfchen, die fein verteilt in einem anderen Medium, etwa einer Flüssigkeit, schweben.

Nicht-lineare Schwingungs-Spektroskopie
Wird anders als lineare Spektroskopie nicht mit einem, sondern mit zwei eingestrahlten Lasern betrieben. Der erste regt ein Molekül zum Schwingen an. Abhängig von ihrer Struktur sprechen die Moleküle dabei auf unterschiedliche Frequenzen an. Der zweite Laser regt das Molekül dazu an, selbst ein Photon zu emittieren. Diese Methode funktioniert nur bei Molekülen in einer asymmetrischen Umgebung, also etwa an Oberflächen.

Lichtstreuung
Licht, das aus einer Richtung auf ein Teilchen trifft, wird in unterschiedliche Richtungen gestreut. Denn das einfallende Licht verwandelt das Teilchen vorübergehend in einen elektrischen Dipol, der schwingt und dabei Licht abgibt. Die Richtung des gestreuten Lichtes hängt von der Größe und Form der Teilchen ab.



Agrarwüste statt Regenwald. In vielen Gebieten der Erde hat der Mensch natürliche Vegetation durch Wiesen und Felder ersetzt. Dies hat Folgen für das Klima.

Landwirtschaft **pflügt das Klima um**

Seit der Erfindung von Ackerbau und Viehzucht wandelt der Mensch natürliche Vegetation in Acker- und Weideland um. Die Pflanzengemeinschaften der Kontinente bestimmen jedoch unser Klima auf vielfältige Weise mit. Der Mensch hat also möglicherweise schon Klimaveränderungen verursacht, lange bevor er begann, massiv Öl und Kohle zu verbrennen. Wissenschaftler am **Max-Planck-Institut für Meteorologie** in Hamburg haben die Ausbreitung der Landwirtschaft im letzten Jahrtausend untersucht. Dabei zeigt sich, dass der Mensch insbesondere das regionale Klima schon vor Beginn der Industrialisierung stark beeinflusst hat.

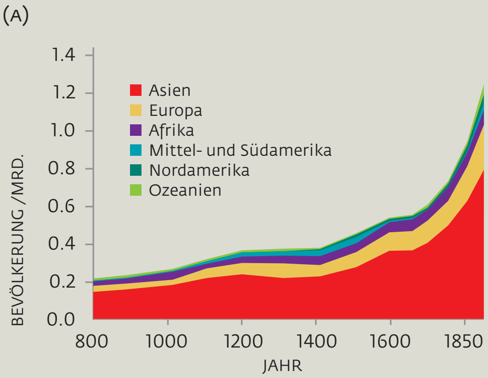
TEXT **JULIA PONGRATZ, CHRISTIAN REICK (MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR METEOROLOGIE)**

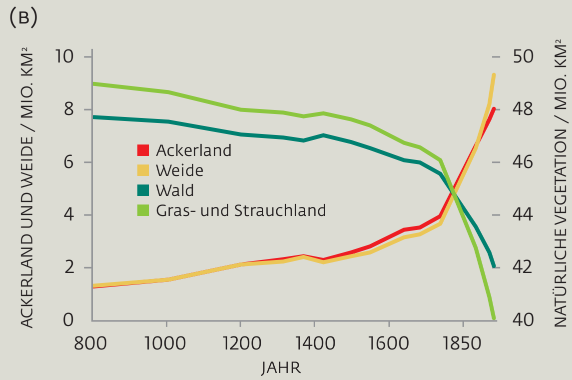
Kirchenbücher als Studienobjekt von Wissenschaftlern – die meisten Menschen denken dabei wahrscheinlich an Theologen und Ahnenforscher. Nur die wenigsten kämen auf die Idee, dass sie auch für Klimaforscher wichtige Erkenntnisse bereithalten. Denn diese viele Jahrhunderte zurückreichenden Aufzeichnungen enthalten wichtige Informationen zur Bevölkerungsentwicklung und damit auch zur landwirtschaftlich genutzten Fläche. Wenn aber aus natürlicher Vegetation Äcker und Felder werden, hat dies Folgen für das Klima. Für uns Klimaforscher ist es deswegen ein Glück, dass Demografen uns in den letzten Jahrzehnten schon die Arbeit abgenommen haben, aus historischen Dokumenten Daten zur weltweiten Bevölkerungsentwicklung abzuleiten. Daraus können wir den Einfluss des Menschen auf das Weltklima in früheren Zeiten ableiten.

Die vorindustrielle Zeit eignet sich besonders gut, um die Folgen der Landnutzung für das Klima zu analysieren. Denn vor 1850 war die weltweit voranschreitende Ausdehnung der Landwirtschaft die einzige „menschengemachte“ Störung des globalen Klimasystems. Da die gewonnenen Ackerflächen häufig durch Rodung von Wäldern entstanden, landete der im Holz gespeicherte Kohlenstoff über kurz oder lang als Bestandteil von Kohlendioxid in der Atmosphäre. Erst ab Mitte des 20. Jahrhunderts setzt der Mensch deutlich mehr des Treibhausgases Kohlendioxid durch die Verbrennung fossiler Energieträger frei als durch die Änderung der Vegetation. Seitdem ist der gegenwärtig beobachtete weltweite Klimawandel hauptsächlich durch Abgase aus der Verbrennung von Kohle, Öl und Erdgas bestimmt.

KONTINENTE WIRKEN ALS KOHLENSTOFFSPEICHER

Vernichtung von Vegetation führt also zum Ausstoß von Kohlendioxid. Gleichzeitig macht die Pflanzenwelt der Erde einen Teil des in die Atmosphäre entlassenen Kohlendioxids wieder unschädlich. Denn Pflanzen nehmen Kohlendioxid mithilfe der Fotosynthese aus der Atmosphäre auf und binden den darin enthaltenen Kohlenstoff unter Abgabe von Sauerstoff in organischen Verbindungen. So nahmen die Kontinente in den 1990er-Jahren von den jährlich etwa 6,4 Gigatonnen (Milliarden Tonnen) Kohlenstoff aus der Verbrennung von Kohle, Öl und Erdgas etwa eine Gigatonne wieder auf. Die Kontinente speichern also immerhin 15 Prozent der fossilen Emissionen jedes Jahr. Man spricht daher auch von einer sogenannten Land-Kohlenstoffsenke. Die Vegetation der Kontinente kann auf diese Weise dem globalen Temperaturanstieg entgegenwirken. Denn die weltweite Erwärmung hängt direkt mit dem Anstieg der Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre zusammen: Kohlendioxid verringert die Durchlässigkeit der Atmosphäre für die Wärmerückstrahlung der Erde, wodurch sich die unteren Luftschichten aufheizen. Die Land-Kohlenstoffsenke vermindert also den Temperaturanstieg, den wir ansonsten als Folge der Verbrennung fossiler Energieträger und der Ausdehnung landwirtschaftlicher Flächen zu erwarten hätten. >



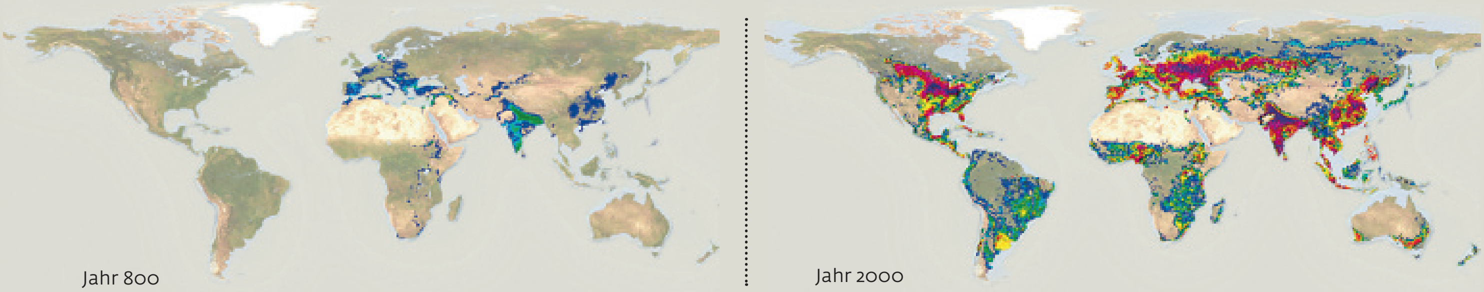


(A) Zwischen 800 und 1850 n. Chr. wächst die Bevölkerung vor allem in Europa und Asien immer weiter an. (B) Globale Flächenentwicklung verschiedener natürlicher und landwirtschaftlicher Vegetationstypen 800–1850. Parallel zur wachsenden Weltbevölkerung wurden schon in vorindustrieller Zeit weite Flächen natürlicher Vegetation in landwirtschaftliche Flächen umgewandelt.

Vegetation ist allerdings auch noch in anderer Hinsicht klimarelevant. Die unterschiedlichen Vegetationstypen beeinflussen den Energie-, Wasser- und Impulsaustausch zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche. Sie wirken sich vor allem auf das regionale Klima aus. So erscheinen Graslandschaften aus der Vogelperspektive typischerweise heller als z. B. Wälder, Wissenschaftler sprechen von einer höheren Albedo. Dementsprechend reflektieren Grasflächen Sonnenlicht besser und erwärmen sich deshalb schwächer. Gleichzeitig verdunsten Wälder mehr Wasser über ihre Blätter und Nadeln, da sie oft tiefe Wurzeln besitzen, und kühlen deshalb stärker ab als flachwurzelnde Graslandschaften. Welcher Effekt überwiegt – Erwärmung durch Sonneneinstrahlung oder Selbstkühlung durch Verdunstung –, hängt unter anderem von Sonnenstand, der Verfügbarkeit von Wasser im Boden, Luftfeuchtigkeit und Pflanzentyp ab. Die Pflanzendecke trägt so zusammen mit der vorherrschenden mittleren Sonneneinstrahlung, Windrichtung und Niederschlag wesentlich zum lokalen Klima bei. Am Max-Planck-Institut für Meteorologie untersuchen wir deshalb, wie stark Vegetationsänderungen die Absorption von Sonneneinstrahlung beeinflussen und welche Folgen diese Änderungen für den Kohlendioxid-Austausch zwischen den Landmassen und der Atmosphäre haben.

Seit dem Ende der letzten Eiszeit vor 10 000 Jahren hat sich das Klima natürlicherweise verändert. Als Folge haben sich neue Pflanzengemeinschaften gebildet und ausgebreitet. Dazu kommt der Mensch: Durch Ackerbau, Forstwirtschaft und Urbanisierung hat er stark in die natürlichen Austauschprozesse zwischen Atmosphäre und den Pflanzen der Kontinente eingegriffen. Berechnungen zufolge werden heute etwa 24 Prozent des weltweiten Pflanzenwachstums durch den Menschen kontrolliert. In den Jahrtausenden zwischen 9000 und 5000 Jahren vor heute entwickelten sich Ackerbau und Viehzucht in mindestens vier Regionen unabhängig voneinander: im sogenannten Fruchtbaren Halbmond Kleinasiens, in Teilen Chinas und in Mittel- und Südamerika. Von dort breiteten sich die Landwirtschaft treibenden Kulturen aus und verdrängten nach und nach geschichtlich ältere Jäger- und Sammlergesellschaften. Leider gibt es kaum genaue Aufzeichnungen darüber, wie viel Fläche in einer Region zu einem bestimmten Zeitpunkt landwirtschaftlich genutzt wurde. Dieser Mangel an Daten erschwerte bislang die





Immer mehr Menschen benötigen immer mehr Nahrungsmittel: Ackerland im Jahr 800 (links) und 2000 (rechts). Der Farbbalken gibt den Anteil der landwirtschaftlich genutzten Fläche an der Gesamtfläche an (grau: 0%, violett: 100%).

0% 50% 100%

Grafik: Deutsches Klimarechenzentrum – MPI für Meteorologie (2) (oben). Foto: Fotolia (unten)

Untersuchung von Veränderungen der globalen Vegetationsverteilung und deren Rolle im Klimageschehen.

WELTKARTE DER LANDWIRTSCHAFT

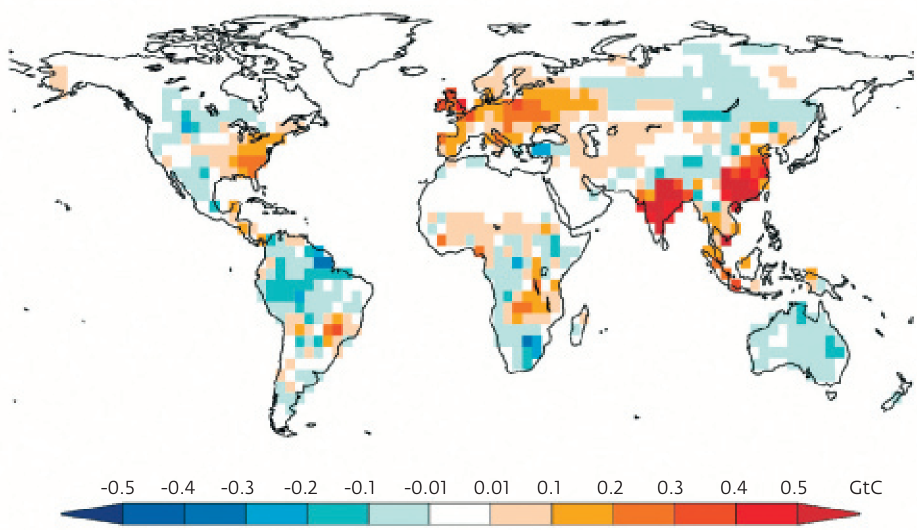
Deshalb mussten wir andere Informationsquellen, nämlich die bereits zu Beginn erwähnten Daten zur Bevölkerungsentwicklung nutzen. Die Größe der Bevölkerung und die landwirtschaftlich genutzte Fläche hängen eng zusammen. Vor der industriellen Revolution war Fernhandel auf wertvolle Güter wie etwa Gewürze beschränkt, Grundnahrungsmittel konnten kaum in ausreichender Menge über größere Entfernungen transportiert werden. Deswegen kann man für die Zeit zwischen Mittelalter und industrieller Revolution von der regionalen Bevölkerungszahl auf die benötigte landwirtschaftliche Fläche schließen. Wir haben diesen Zusammenhang genutzt und haben einen Datensatz erstellt, der weltweit die Verteilung von Acker- und Weideflächen seit dem Jahr 800 nach Christus nachzeichnet. Unsicherheiten bezüglich der Bevölkerungsdaten und der Einfluss von sich ändernden Agrartechniken sind dabei berücksichtigt. Darüber hinaus haben wir rekonstruiert, wie die landwirtschaftliche Expansion die Verteilung von Wäldern und natürlichen Gras- und Strauchlandschaften beeinflusst. Demnach nimmt die natürliche Vegetation bereits in vorindustrieller Zeit zugunsten von Acker- und Weideflächen deutlich ab.

KOHLENDIOXID-ANSTIEG DURCH PFLUG UND AXT

Gerade das letzte Jahrtausend ist in dieser Hinsicht besonders interessant: Zwischen 800 und dem frühen 18. Jahrhundert verdreifachte sich die Weltbevölkerung auf eine Milliarde Menschen. Es muss also eine landwirtschaftliche Expansion von nie zuvor dagewesener Stärke stattgefunden haben. Wenn wir daher in diesem Zeitraum keine menschengemachte Klimaänderung nachweisen können, so ist dies auch für die vorangegangenen Jahrtausende nicht zu erwarten. Der Einfluss des Menschen auf das Klima



Hypothek aus vorindustrieller Zeit: Seit vielen Jahrhunderten bearbeitet der Mensch seine Umwelt mit dem Pflug. Dadurch beeinflusste er den Wärmeaustausch zwischen Land und Atmosphäre – lange vor der massenhaften Verbrennung von Öl und Gas.



Schon in vorindustrieller Zeit entweicht Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid in die Atmosphäre. Zwischen 800 und 1850 verlieren besonders die landwirtschaftlich wichtigen Regionen Kohlenstoff an die Atmosphäre (rosa bis dunkelrot), während viele naturbelassene Regionen als Folge der landwirtschaftlichen Verluste eher Kohlenstoff aufnehmen (hellblau bis dunkelblau). (Angaben in Milliarden Tonnen Kohlenstoff (GtC) pro Gitterzelle des Klimamodells)

hätte dann wie meist angenommen erst mit der massenhaften Verfeuerung von Öl und Kohle während der industriellen Revolution begonnen.

Wir kommen in unserer Studie allerdings zu einem anderen Ergebnis. Klimamodelle erlauben es uns heute, die Wechselwirkungen zwischen Vegetation, Atmosphäre und Ozean über lange Zeiträume auf Großrechnern zu simulieren. Mit der Rekonstruktion der Landnutzung im letzten Jahrtausend und einem an unserem Institut entwickelten Erdsystemmodell können wir abschätzen, wie sich der Kohlenstoffkreislauf und das Klima durch den Einfluss der Landwirtschaft verändert haben. In den Zentren der historischen Landwirtschaft in Europa, Indien und China hat sich demnach die Landwirtschaft zwischen den Jahren 800 und 1850 auf Kosten von Waldgebieten stark ausgebreitet und zu einem Verlust von weltweit 53 Gigatonnen Kohlenstoff geführt. Gleichzeitig werden über die Land-Kohlenstoffsenke 25 Gigatonnen aufgenommen. Besonders in naturbelassenen Regionen wie den tropischen Regenwäldern wurde also fast die Hälfte der Emissionen wieder gespeichert. Pflanzen wachsen nämlich bei höheren Kohlendioxid-Werten schneller – dadurch können sie mehr von dem Treibhausgas binden und den Anstieg in der Atmosphäre zumindest teilweise kompensieren. Ein Prozess, den Wissenschaftler als „Kohlendioxid-Düngung“ der Pflanzen bezeichnen.

LOKALER KLIMAWANDEL AUCH OHNE INDUSTRIE

Diese Zahlen belegen, dass durch die landwirtschaftliche Entwicklung in der vorindustriellen Zeit des letzten Jahrtausends netto etwa 28 Gigatonnen Kohlenstoff in die Atmosphäre entlassen wurden. Diese Emissionen blieben jahrhundertelang sehr klein und trugen erst zwischen dem 16. und 18. Jahrhundert stärker zur atmosphärischen Kohlendioxid-Konzentration bei, als durch natürliche Klimaschwankungen allein erklärbar wäre. Es sieht also so aus, als ob der Mensch zwar erst spät, aber noch vor der Industrialisierung die Kohlendioxid-Konzentration der Atmosphäre erhöht hat. Dieser Kohlendioxid-Anstieg ist allerdings zu gering, um die Temperatur global merklich zu ändern.

Auf regionaler Ebene hat der Mensch das Klima dagegen auch schon vor der Industrialisierung beeinflusst. Simulationen zeigen, dass der Mensch bereits vor über tausend Jahren die Energiebilanz einiger Regionen verändert hat, weil sich mit der Landnutzung auch die Albedo der Landoberfläche gewandelt hat. Besonders in Europa, Indien und China hat die aufgenommene Sonneneinstrahlung rund zwei Watt pro Quadratmeter abgenommen. Eine solche Änderung ist lokal genauso stark wie der gegenwärtige Treibhauseffekt, allerdings hat sie einen entgegengesetzten – sprich abkühlenden – Effekt.

Sogar geschichtliche Ereignisse können sich durch solche biogeophysikalischen Effekte regional auf das Klima durchpausen: So hat sich der wachsende menschliche Einfluss im 14. Jahrhundert auf die Energiebilanz Europas deutlich abgeschwächt. Hervorgerufen wurde dies durch die Pestepidemie, der etwa ein Drittel der Be-



Helle Wiesen reflektieren mehr Sonnenenergie als vergleichsweise dunkle Äcker und Wälder. Die Art der Vegetation bestimmt so das lokale Klima mit.



Wald ist nicht gleich Wald. Die Wiederaufforstung von abgeholzten Waldflächen wirkt sich in den Tropen und in den gemäßigten Zonen unterschiedlich auf das Klima aus.

völkerung zum Opfer fiel und in deren Folge weite landwirtschaftliche Flächen zeitweise aufgegeben wurden. Ähnliche Folgen hatten der Einfall der Mongolen im 13. Jahrhundert in China und die mit der Invasion der Europäer eingeschleppten Krankheiten bei den Hochkulturen Amerikas.

KLIMASCHUTZ DURCH AUFFORSTUNG?

Schon in vorindustrieller Zeit hat der Mensch somit die Energiebilanz regional verändert und den atmosphärischen Kohlendioxid-Gehalt angehoben. Er hat das Gleichgewicht des Kohlenstoffkreislaufs gestört und die Kohlenstoffsenke der Wälder durch Rodung verkleinert. All dies ließ die Menschheit schon mit einer gewissen Vorbelastung in die industrielle Ära eintreten. Die Landnutzung aus der Vergangenheit wirkt dadurch auf das heutige und zukünftige Klima weiter.

Während dieser Einfluss auf das Klima bislang nur ein unbeabsichtigter Nebeneffekt war, soll Landnutzung in der Zukunft zielgerichtet eingesetzt werden, um dem Klimawandel entgegenzuwirken. So wird vielfach die Wiederaufforstung landwirtschaftlicher Flächen gefordert, um der Atmosphäre Kohlendioxid zu entziehen und den gegenwärtigen Klimawandel abzuschwächen. Wiederaufforstung ist jedoch nicht immer ein Mittel gegen den Klimawandel, sie kann die Erwärmung auch beschleunigen: Studien zeigen, dass in den mittleren und hohen Breiten durch die Wiederbewaldung die Albedo so stark gesenkt und dadurch so viel mehr Sonnenstrahlung aufgenommen wird, dass der abkühlende Effekt der Kohlendioxid-Aufnahme nicht zum Tragen kommt. In den Tropen hingegen spielt die hohe Verdunstung der Wälder eine größere Rolle und wirkt zusammen mit der Kohlendioxid-Aufnahme kühlend. Die Abholzung des tropischen Regenwalds zu stoppen, der gerodet wird, um landwirtschaftliche Nutzfläche zu gewinnen, könnte daher wirkungsvoller sein, als Wälder in gemäßigten Zonen wieder aufzuforsten. Die Entwicklung des Klimas wird also auch in Zukunft von landwirtschaftlichen Entscheidungen abhängen. ◂

GLOSSAR

Albedo
Ist ein Maß dafür, wie stark die Kontinente, Ozeane oder Wolken das Sonnenlicht zurückwerfen. Helle Flächen besitzen eine höhere Albedo als dunkle.

Kohlenstoffsenke
Die Landmassen und Ozeane können Kohlenstoff aus der Atmosphäre entfernen und dauerhaft binden. Daran sind in erster Linie Pflanzen beteiligt: Diese nehmen Kohlendioxid auf und bilden daraus organische Verbindungen. Aber auch bei geologischen Prozessen wie der Bildung von Kalkgestein wird Kohlendioxid gebunden.

Foto: Istockphoto

Wie der Laser **ans Licht kam**



Steil ging es mit Lasern anfangs nicht nach oben, heute finden sie aber viele Anwendungen. Dieser Laser am französischen Centre d'Essais des Landes etwa misst Zusammensetzung und Turbulenzen der Atmosphäre.

Vor 50 Jahren leuchtete zum ersten Mal ein Laser. Inzwischen strahlen die intensiven Lichtquellen allerorten: von der Automobilproduktion bis zum CD-Spieler. Wissenschaftler des **Max-Planck-Instituts für Ökonomik** zeichnen seine wirtschaftliche Entwicklung in einem Kooperationsprojekt nach – und rütteln dabei an gängigen Annahmen, wie sich neue Techniken etablieren.

TEXT **RALF GRÖTKER**

Die Marsmenschen kommen. Und sie werden mit unschlagbaren Strahlenwaffen ausgerüstet sein! Ein solches Horrorszenario malte der amerikanische Schriftsteller Herbert G. Wells schon in seinem 1898 erschienenen Buch *Krieg der Welten* aus – mehr als ein halbes Jahrhundert bevor die wunderbare Strahlentechnik namens *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, kurz: *Laser* überhaupt erfunden wurde.

„Spätestens seit Einstein 1916 die Theorie der stimulierten Emission formuliert hatte, war auch wissenschaftlich erwiesen, dass eine derartige Lichtquelle existieren würde", bestätigt Helmuth Albrecht, Technikhistoriker an der TU Bergakademie Freiberg. „Und man kannte auch die Eigenschaften: extreme Bündelung und hohe Energiedichte. Sogar dass mit dem Laser Entfernungen messen und Nachrichten übertragen kann, stand lange vor der eigentlichen Erfindung fest."

Albrecht ist einer der Partner im LASSSIE-Projekt: „Lasers: A Spatial-Sectoral System of Innovation and its Evolution". Übersetzt heißt das in etwa: „Die Evolution des Innovationssystems ‚Laser' – mit Regionalbezug und unter Beteiligung der Sektoren Wissenschaft/Wirtschaft/Politik". In dem von der Volkswagen Stiftung finanzierten Projekt sind neben der Bergakademie Freiberg Wirtschaftswissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Ökonomik in Jena und der Friedrich-Schiller Universität Jena beteiligt.

TECHNOLOGIE-POLITIK, ABER SINNVOLL

Gemeinsames Ziel ist es, am Beispiel der Laserentwicklung allgemeine Muster von Technologietransfer und Wirtschaftsentwicklung aufzuspüren. Der Laser ist dafür denkbar gut geeignet. Fortschritte in der Technik sind ohne immer neue Erkenntnisse der Forschung undenkbar. Gleichzeitig gibt es einen ausgeprägten kommerziellen Sektor mit einer Vielzahl verschiedener Laser-bezogener Produkte und Anwendungen. Schließlich lässt sich die Entwicklung auch noch im internationalen Vergleich studieren.

Im Vordergrund des Projekts steht die Frage nach dem Systemcharakter der Laserentwicklung. „In den 1950er-Jahren glaubte man noch ganz naiv, dass sich Technik und Wirtschaft so entwickeln, wie Institutionen dies vorgeben: Erst kommt die Grundlagenforschung, dann die angewandte Forschung, schließlich die Umsetzung durch die Industrie", erklärt der Jenaer Regionalökonom Michael Fritsch, der auch Unternehmungsgründungen erforscht: „Heute geht man dagegen von sogenannten Innovationssystemen aus – voneinander abhängigen und miteinander agierenden Akteuren, die räumlich getrennt sind und über die Sektoren Wirtschaft, Politik und Forschung hinweg verteilt."

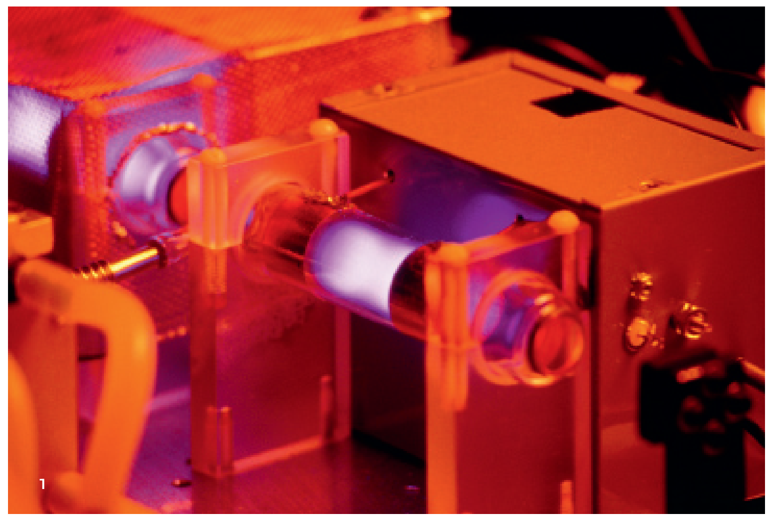
Dieser Gedanke spielt auch in der Wirtschaftspolitik eine Rolle. „Es entspricht einer verbreiteten Annahme, dass ein koordiniertes Zusammenwirken von Politik, öffentlicher Forschungsförderung und dem Unternehmenssektor für die Volkswirtschaft zu besseren Ergebnissen führt als vollkommen freier Wettbewerb", so Fritsch. Als Beweis dafür werde gern der Erfolg der japanischen Industrie der Achzigerjahre ins Feld geführt, die stark von dem damaligen Ministry of Commerce and Industry, MITI, gesteuert wurde.

Tatsächlich weiß man wenig darüber, was wirklich auf der Mikroebene passiert. Das ist, gelinde gesagt, ungünstig: Denn Kenntnis der Zusammenhänge wäre eine Voraussetzung für eine sinnvolle Technologie-Politik. Die Partner des LASSSIE-Projekts wollen deshalb herausfinden, inwiefern die

Foto: SPL-Agentur Focus

1 | Bitte pusten Sie ins Licht: Ein Kohlendioxid-Laser hilft bei der Diagnose von Magengeschwüren, indem er die verursachenden Bakterien anhand ihrer Stoffwechselprodukte identifiziert. Laser gehören in der Medizin heute zum Standard – als Skalpelle und optische Bohrer für den Zahnschmelz, um Nierensteine zu entfernen oder Fehlsichtigkeit zu korrigieren.

2 | Wenn Astronomen ein Stern aufgeht, haben sie ihn vielleicht selbst gemacht. Ein Laser spiegelt ihnen einen Stern am Firmament vor, der als Modell dient, um im Teleskop die ständigen Turbulenzen innerhalb der Atmosphäre zu eliminieren.



Entwicklung der Lasertechnologie in Deutschland in Form eines „koordinierten Zusammenwirkens" erfolgte – oder auf anderem Wege.

Guido Bünstorf, Forschungsgruppenleiter in der Abteilung Evolutionsökonomik am Jenaer Max-Planck-Institut und Mit-Initiator von LASSSIE, hat in den vergangenen Jahren die Entwicklung einer ganze Reihe von Wirtschaftszweigen eingehend untersucht, meist in enger Zusammenarbeit mit Steven Klepper, Ökonom an der Carnegie Mellon Universität. Dabei haben die beiden Wissenschaftler herausgefunden, dass es in der Wirtschaft meist nicht so zugeht wie im Japan der 1980er-Jahre, sondern eher wie in Darwins Evolutionslehre. Statt auf das „System" kommt es dabei meist eher auf den folgenreichen Ausnahmefall an.

Klepper hat gezeigt, dass die gesamte US-Automobilindustrie rund um Detroit nachweislich aus dem Keim einer einzigen Firma hervorgegangen ist: Olds Motor Works. General Motors, Cadillac, Ford, Dodge und Chevrolet, sie alle sind Kinder und Kindeskinder von Olds. Auf ähnliche Weise entstanden auch die Halbleiterproduktion in Silicon Valley und die „Gummihaupstadt" Akron. Die Stadt am Ohio und Erie Canal befand sich Ende des 19. Jahrhunderts im raschen Aufbau und prosperierte als Umschlagplatz für Kohle und Getreideprodukte. „Greetings from Akron Ohio": Auf einer Postkarte in Bünstorfs Büro kündet ein Cartoon aus den Dreißigerjahren mit imposanten Hochhäusern, breiten Straßen und einem Zeppelin am Himmel von der Euphorie des Aufschwungs.

Der New Yorker Gummifabrikant Goodrich fand dort Investoren und siedelte sich in Akron an. 1888 übernahmen die Söhne das Geschäft und stellten bald den ersten Ballonreifen für Autos her. Anfangs in Kooperation mit Goodrich, gründete auch der Pferdewagen-Reifen-Fabrikant Harvey S. Firestone ein Unternehmen. Schließlich gründeten die Söhne des Investors, der bei Vater Goodrich eingestiegen war, ebenfalls eine eigene Reifenfirma: Goodyear. Aus diesen dreien entstand, quasi durch Vererbung, so gut wie die gesamte US-Reifenindustrie.

Bünstorf und Klepper haben zu den von ihnen untersuchten Fällen Unmengen an Detailinformationen und Daten gesammelt und statistisch ausgewertet, typische Verhaltensmuster analysiert und mit ihrer Hilfe mathematische Modelle der Industrieentwicklung getestet. Auch der Laser gehört zu ihren Forschungsthemen.

Am Anfang von LASSSIE stand so etwas wie eine Wette. „Angefangen hat alles eigentlich in Pittsburgh, bei Familie Klepper am Küchentisch", erzählt Guido Bünstorf. „Ich habe Steve von meinen Plänen für das Laser-Projekt erzählt. Er meinte: ‚Ich glaube nicht an Innovationssysteme'." Der Ausgang der Wette hängt vom betrachteten Zeitraum ab, aber letztlich muss Steve Klepper sie wohl doch verloren geben. Denn die Laserbranche in Deutschland besaß zwar mehr als zehn Jahre lang keinen Systemcharakter, nahm ihn nach den Erkenntnissen von LASSSIE aber in den 1980er-Jahren an.

ERSTE ANTWORTEN AUF DIE SYSTEMFRAGE

Das Forschungsprojekt zeichnet die Entwicklung im Detail nach. Erste Untersuchungen sind bereits abgeschlossen. Beim Treffen der Projektpartner im holzgetäfelten Sitzungssaal im Jenaer Max-Planck-Institut im November liegt ein Stapel frisch abgeschlossener Diplomarbeiten auf dem Tisch. Helmuth Albrecht ist aus Freiberg angereist, Guido Bünstorf aus Kassel, wo er eine Professur übernimmt, und Michael Fritsch von der Universität Jena, wo er den

Foto: SPL-Agentur Focus

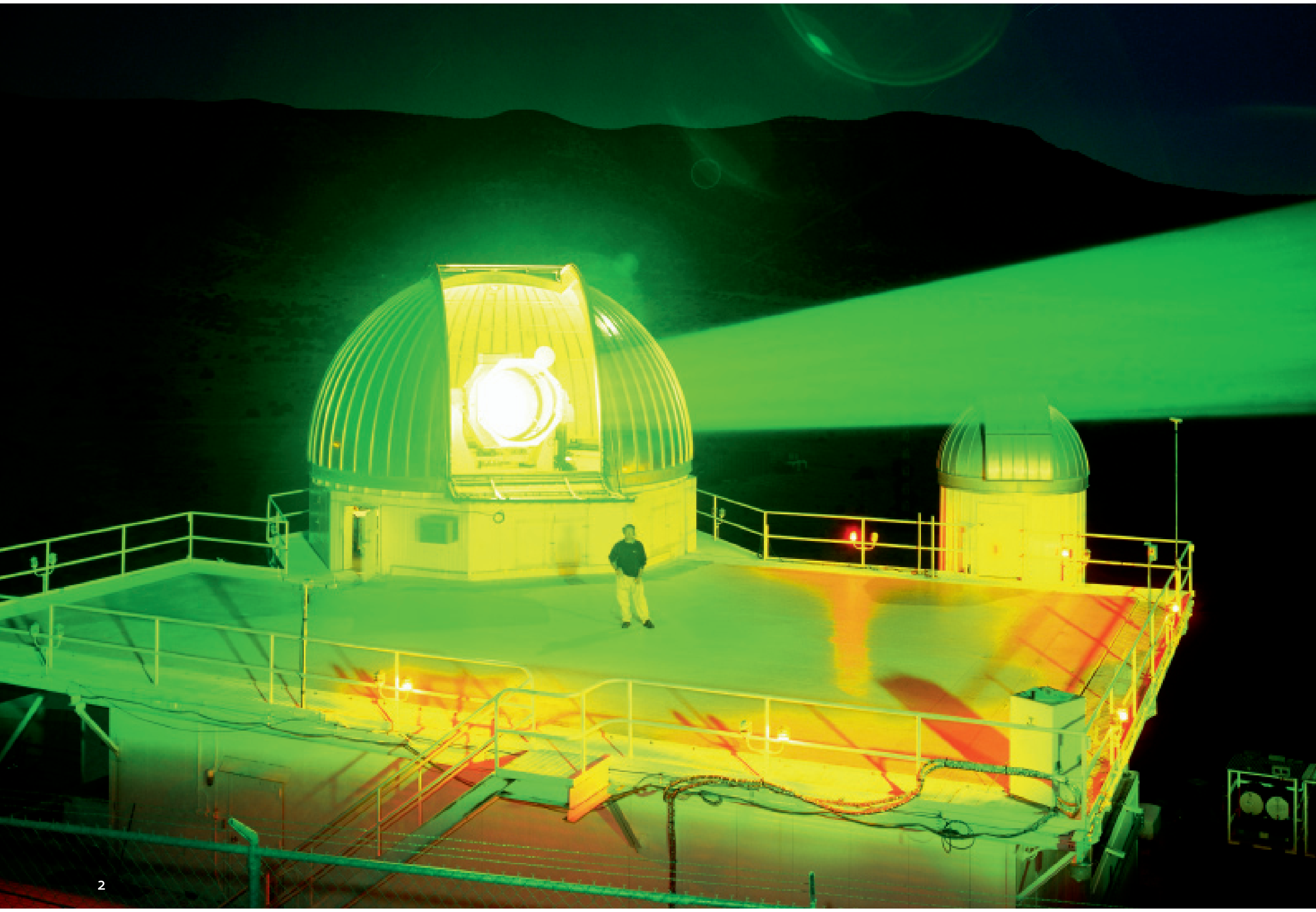

2

Foto: SPL-Agentur Focus

Lehrstuhl für Unternehmensentwicklung, Innovation und wirtschaftlichen Wandel innehat. Außerdem dabei: Wolfgang Ziegler, Leiter der Patentinformationsstelle an der Universität Jena, der auf das Projekt aufmerksam wurde, als er ebenfalls einen Antrag bei der VW-Stiftung stellte. „Für uns ein Glücksfall: Ziegler kommt selbst aus der Laserforschung und weiß über alles Bescheid, was in der DDR stattgefunden hat", sagt Bünstorf.

Die Sitzung beginnt mit der Präsentation einer Studie zum Thema Teambildung. Ein Diplomand stellt seine Arbeit in der Runde vor. Analysiert hat er „die unter der IPC H01s klassifizierten Patente, die sich mit Laserquellen beschäftigen. Nur deutsche Anmelder". 3369 Laser-bezogene Patentanmeldungen aus den Jahren 1961 bis 2005 sind so zusammengekommen. Untersucht wurde die Größe der Erfinderteams, ebenso wie ihre Stabilität: Melden die Erfinder in dieser Konstellation häufiger ein Patent an? Wie oft melden im Vergleich dazu Einzelerfinder ein Patent an? Die Antworten auf diese Fragen geben auch Auskunft über den Systemcharakter der Branche.

ZUNÄCHST KAUM KOOPERATION

Die aufwendig aufbereiteten Daten lassen Trendaussagen zu: Die Größe der Patent-Teams steigt deutlich und kontinuierlich an – was vermutlich mit der zunehmenden Komplexität der Materie zusammenhängt. Gleichzeitig gibt es Hinweise darauf, dass Wissenschaftler immer häufiger ihr Team wechseln – ein Zeichen für einen Zuwachs an Vernetzung. Aus der Runde kommen Fragen, Vorschläge, Anregungen. Wäre es möglich, das Ganze nach Bereichen aufzuschlüsseln? Könnte man das Gleiche nicht auch für Publikationen statt für Patente machen? Wie fiele wohl das Ergebnis für andere Industriezweige aus?

„Eine wichtige Aktivität im LASSSIE-Projekt besteht im Datensammeln": so Guido Bünstorf. Grundlage für die Erhebungen sind Unternehmensregister, Patentanmeldungen, Publikationsstatistiken, Dissertationen, Messekataloge und Fachzeitschriften. Dazu kommen Interviews mit den maßgeblichen Akteuren aus Wirtschaft und Forschung. „Wir bauen eine Datenbank auf, in der nach Jahren sortiert alle Ereignisse der Entwicklung abgefragt werden können – in einem Detailgrad, der für den betrachteten Zeitraum von knapp fünfzig Jahren meines Wissens nach für keine andere Technologie irgendwo auf der Welt existiert." Die Forscher verfolgen dabei das Ziel, Einzelpersonen über die Zeit hinweg auf ihrem Weg im Innovationssystem verfolgen zu können – von der Dissertation über Veröffentlichungen und Patentanmeldungen bis hin zu einer eventuellen Unternehmensgründung.

Alles in allem zeichnet sich in den Daten folgendes Bild ab: „In den Sechziger- und Siebzigerjahren gab es kaum Kooperationen. Wenig Spin-offs aus Hochschulen oder bestehenden Unternehmen. Geringe räumliche Mobilität

unter den Unternehmen. Austausch zwischen Universitäts- und Industrieforschern hat es nur auf Konferenzen gegeben", resümiert Michael Fritsch. Von einem Systemcharakter kann in dieser Zeit mithin nicht die Rede sein. Verschiedene Formen der Vernetzung innerhalb der Laserszene nehmen erst ab den 1980er-Jahren zu. Die Forschungsförderung (ein in einer eigenen Dissertation untersuchtes Thema) tritt verstärkt auf den Plan. Die Gründung anwendungsorientierter Forschungseinrichtungen wie etwa des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik (ILT) in Aachen oder des Instituts für Strahlwerkzeuge in Stuttgart erfährt politische Unterstützung.

Diese Beobachtungen werfen eine spannende Frage auf: Wie ist es zu erklären, dass Deutschland in wichtigen Bereichen der Lasertechnik eine international führende Rolle einnehmen konnte, obwohl es ein System – und somit breite öffentliche Unterstützung – erst ab den 1980er-Jahren gab? Ist der Zusammenhang zwischen wirtschaftlichem Erfolg und gezielter Förderung von Schlüsseltechnologien vielleicht lockerer, als dies in der Wirtschafts- und Forschungspolitik üblicherweise angenommen wird? Ein Blick in die Geschichte gibt in dieser Frage Aufschluss.

EINEM AUSSENSEITER GELINGT DER GROSSE WURF

Erfunden wurde der Laser von Theodore H. Maiman – einem wissenschaftlichen Außenseiter, der bei der Hughes Aircraft Corporation in Kalifornien in einem Forschungslabor arbeitete. „Irgendwann im Frühsommer 1960 muss Maiman der Durchbruch gelungen sein", erklärt der Historiker Albrecht. „Es gelang ihm, einen Lasereffekt mit einem Rubinkristall zu erzeugen." Gleichzeitig, aber ohne Kenntnis von Maiman zu haben, tüftelte auch eine Arbeitsgruppe des späteren Physik-Nobelpreisträgers Arthur Schawlow am Laser. Schawlows Gruppe schaffte es nur wenige Monate später, im Oktober 1960, einen Laserstrahl zu erzeugen – und vermochte, anders als der Rivale Maiman, dieses Ergebnis auch in der Fachzeitschrift PHYSICAL REVIEW LETTERS zu veröffentlichen. „Damit ging es los", so Albrecht: „Sofort fingen alle an, die Versuche nachzumachen. Bis Silvester 1961 hatten es die meisten geschafft."

Siemens in München hatte schon vor dem Zweiten Weltkrieg Forschung im Mikrowellenbereich zum Einsatz in der Nachrichtentechnik betrieben und

„Eine Lösung, die ein Problem sucht", sagte Theodore Maiman über den ersten Laser – einen Rubinlaser, der hier in Einzelteile zerlegt ist. Maiman baute ihn gemeinsam mit seinem Assistenten Charles Asawa in den Hughes Research Laboratories und nahm ihn am 16. Mai 1960 erstmals in Betrieb.

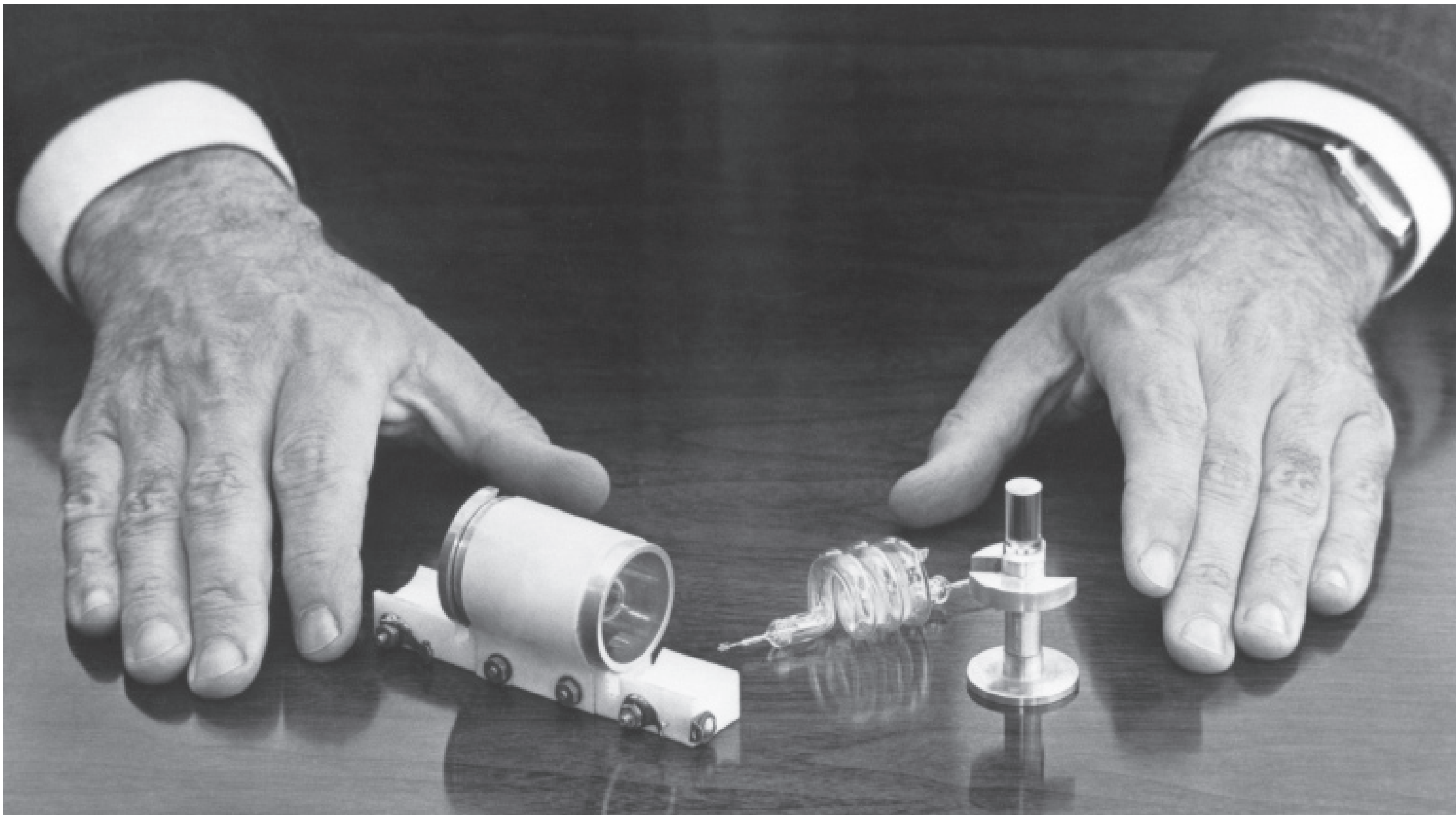


Foto: SPL-Agentur Focus

daran nach 1955, als die Forschungsbeschränkungen durch die Alliierten aufgehoben wurden, angeknüpft. 1961 arbeiteten in der Firma gleich zwei Teams in Konkurrenz an der neuen Technik. Es gelang sogar, den Laser nachzubauen, noch bevor das Schawlow-Team seine Ergebnisse publiziert hatte. Die deutsche Forschungslandschaft wurde dadurch nachhaltig geprägt: München entwickelte sich dank Siemens, in Konkurrenz mit Jena und Berlin, zur Hochburg der Laserforschung in Deutschland – wozu auch das 1960 gegründete, 1971 in die Max-Planck-Gesellschaft eingemeindete Institut für Plasmapyhsik in Garching beigetragen hat.

Als der Nachbau des Lasers geglückt war, wurden erste Experimentalreihen gestartet, vor allem in den Bereichen Nachrichtentechnik und Materialbearbeitung. Eigenschaften der neuen Technik wurden systematisch ausgetestet. Schlag auf Schlag wurden immer neue Laserformen entdeckt: Auf die Entdeckung erst des Rubin- und dann des Helium-Neon-Gaslasers folgten in nur wenigen Jahren Glaslaser, Caesium-Gaslaser und Tieftemperatur-Halbleiterlaser, Ionenlaser, Kohlendioxidlaser, chemische Laser und Farbstofflaser.

GLASFASERKABEL BRACHTEN BREITE ANWENDUNG

Den Absatzmarkt für die neue Technik bot zunächst die Forschung selbst. Albrecht: „Die Labore haben sich um den Laser gerissen – nicht nur in der Industrie, sondern auch in den Universitäten und Schulen.“ 1971 gründeten zwei Studenten aus dem Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen das Unternehmen Lambda Physik. Es entwickelte sich mit der Produktion von Wanderwellenstickstofflasern für den Forschungsmarkt zu einem der erfolgreichsten Spin-offs der Max-Planck-Gesellschaft überhaupt.

Bis der Laser auch in der industriellen Produktion zum Einsatz kam, vergingen allerdings weitere zehn Jahre. Das große Problem bestand darin, eine Technik zu konstruieren, die unter Industriebedingungen, als Bauelement in einem Materialbearbeitungszentrum, zuverlässig funktionierte. Kritisch erwies sich dabei vor allem die Strahlführung. „Anfangs hatte man das mit einem Spiegelsystem versucht. Das war aber sehr schwierig, weil der Strahl bei der kleinsten Dejustierung nicht mehr richtig ankam“, sagt Albrecht. Erst seit es Glasfaserkabel gibt, die als Lichtwellenleiter dienen, lassen sich die modernen, hochflexiblen Fertigungssysteme bauen, die heute in vielen Industriezweigen das Schneiden, Bohren und Schweißen übernehmen.

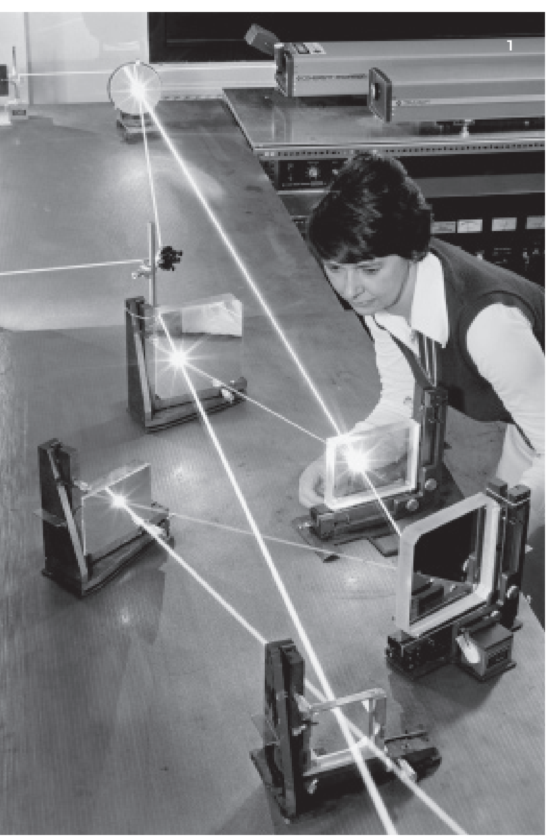
Obwohl der Laser in den USA erfunden wurde, brachten deutsche Maschinenhersteller und Ingenieure ihn zum kommerziellen Erfolg in der Industrieproduktion. Eine der ersten Anwendungen fand der Laser beim Bohren von Uhrensteinen und -federn bei der Firma Haas im Schwarzwaldstädtchen Schramberg. 1970 hatte Haas die ersten Nd-Glaslaser zum Punktschweißen an Spiralfedern gekauft; 1972 baute Haas dann mit der neu gegründeten Tochterfirma HAAS-Laser eigene Geräte. Ein anderes prominentes Beispiel: Berthold Leibinger, Geschäftsführer beim Maschinenbauer Trumpf, stellte 1979 die erste Stanz-Lasermaschine *Trumatic* vor und realisierte damit einen großen kommerziellen Erfolg.

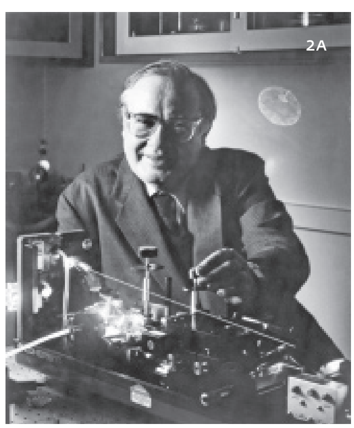
MARKTFÜHRER DEUTSCHLAND

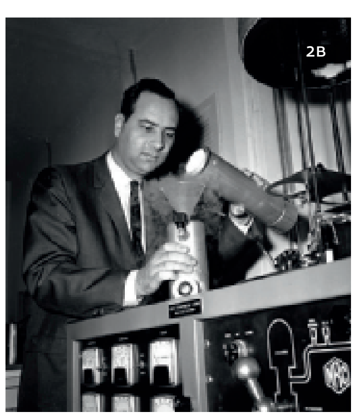
In Sachen Materialbearbeitung mit Lasern wurde die deutsche Industrie Weltmarktführer. Und dies, zumindest in den Anfangsjahren, ganz ohne politische Unterstützung. Für die Wirtschaftsforschung deutet der Erfolg der deutschen Lasertechnik darüber hinaus möglicherweise darauf hin, dass es so etwas wie ein Europäisches Paradox nicht gibt. Als Europäisches Paradox bezeichnen Wirtschaftsforscher die These, dass es den europäischen Industrie-

1 Zunächst fanden Laser vor allem in der Forschung Verwendung, etwa um Interferenzmuster zu erzeugen. Sie entstehen, wenn ein in zwei Arme geteilter Strahl wieder vereinigt und ein Arm dabei ein bisschen verändert wird.

2 Arthur Schawlow (A) entwickelte den Laser parallel zu Theodore Maiman (B). Die beiden wussten nicht, dass sie miteinander konkurrieren.


1


2A


2B



Schneiden mit Licht: Hier durchtrennt ein Kohlendioxid-Laser ein Rohr. Auch zum Schweißen etwa in der Automobilfertigung nutzt die Industrie heute im großen Stil die Hitze des intensiven, gebündelten Lichts.

nationen nicht an Innovationskraft fehle. Vielmehr mangele es ihnen am Willen und Talent, Innovationen auch kommerziell zu verwerten. Daher hinkten sie den USA wirtschaftlich hinterher. Doch als bewährtes deutsches Know-how in der Präzisionsfertigung mit einer neuen Technik zusammentraf, erkannten die Deutschen sehr wohl das kommerzielle Potenzial des Lasers und setzten es auch um.

EINE NEUE TECHNIK VERÄNDERT DEN MARKT

Nicht nur in der Systemfrage und beim Europäischen Paradox überraschte der Laser die Wirtschaftsforscher. Das Geschehen auf dem Lasermarkt lief auch in anderer Hinsicht einer bisher beobachteten Gesetzmäßigkeit der Industrieevolution zuwider. In den meisten Branchen kommt es schon nach wenigen Jahren zum *Shakeout* – dem großen Kehraus, der die meisten Anbieter zum Marktaustritt zwingt und nur eine Handvoll von Großunternehmen überleben lässt. Der Grund dafür: Prozesse der Standardisierung sowie die immer effizientere Gestaltung von Herstellungsprozessen treten gegenüber Produktinnovationen stark in den Vordergrund. Daher haben Newcomer und kleinere Unternehmen keine Chance mehr und die Anzahl der insgesamt auf dem Feld tätigen Unternehmen reduziert sich.

Ganz anders beim Laser. „Obwohl die Laserindustrie als Ganze zulegte, konnten wir über mehr als 30 Jahre hinweg keine Verdrängung kleinerer Unternehmen aus dem Markt feststellen“, berichtet Steven Klepper: „Das war für uns ein totales Rätsel.“ Noch größer war die Verwunderung, als Klepper feststellte, dass die Verdrängung lediglich im Zeitraum von 1961 bis 1994 ausblieb – danach aber eintrat: Die Anzahl der Firmen halbierte sich nahezu. Warum passierte das zu einem so späten Zeitpunkt?

Klepper und seine Mitarbeiter schauten sich die Teilbereiche des Marktes an und stellten fest: Eine Firma, die Laser einer bestimmten Wellenlänge produzierte, hatte nicht unbedingt Wettbewerbsvorteile bei der Herstellung und Vermarktung anderer Lasertypen. Daher machten sich Effekte der Massenherstellung in den ersten Jahren so wenig bemerkbar, und es kam nicht zur Verdrängung. Aber warum änderte sich das dann? „Eine neue Erfindung! Der diodengepumpte Festkörperlaser. Das hat die Ökonomie der Industrie verändert“, behauptet Klepper. „Damit wurde es möglich, mit der gleichen grundlegenden Technik viele verschiedene Wellenlängen zu erzeugen.“

IST DIE ZEIT DES LASERS SCHON VORBEI?

Wenn diese Erklärung richtig ist, dann sollte Ähnliches auch in Deutschland zu beobachten sein. In der Tat: „Im Vergleich zu den USA“, resümiert Bünstorf, „trat die Entwicklung in Deutschland verzögert ein. Aber das Muster ist das gleiche: Erst mit Verspätung kommen die üblichen Prozesse der Industrieentwicklung in Gang.“

Laserdioden haben inzwischen dazu beigetragen, dass Laser heute allgegenwärtig sind: Sie stecken im CD-Spieler, in Verkehrsleitsystemen, medizinischen Geräten, Supermarktkassen und hinter dem Datumsaufdruck auf der Plastik-Trinkwasserflasche. Trotz des Siegeszuges der Technik in immer mehr Anwendungsfeldern ist die große Zeit des Lasers jedoch vielleicht schon vorbei. „In den letzten Jahren konnten wir keine Steigerung der Anzahl an Publikationen mehr ausmachen“, berichtet Bünstorf. Die Frühphase der technischen Entwicklung, die mit einer Steigerung der Forschungsaktivitäten einhergeht, scheint also bereits abgeschlossen. „Da alle Welt vom 21. als dem Jahrhundert der optischen Technologien redet, hätten wir das so nicht erwartet.“ ◂

Foto: SPL-Agentur Focus

Argumente für Antworten

Zentrum Neue Technologien

Ab 20. November 2009

Dauerausstellung Nano- und Biotechnologie
Sonderausstellungen
Neue Materialien und Robotik
Besucher- und Forscherlabor
Präsentationen der Partner

Deutsches Museum

Museumsinsel 1, München · Tel. 089/2179-1 · täglich 9–17 Uhr · www.deutsches-museum.de
Partner: Amgen GmbH · BMBF · Helmholtz-Gemeinschaft · Max-Planck-Gesellschaft · Fraunhofer-Gesellschaft

Deutschlands
Aufbruch ins All

Vor 40 Jahren startete der erste deutsche Satellit in den Weltraum und machte das Land zur Raumfahrtnation. *AZUR*, so der Name des Projekts, sollte unter anderem den Polarlichtern auf die Schliche kommen. Wissenschaftlicher Leiter war **Erhard Keppler** vom damaligen **Max-Planck-Institut für Aeronomie** in Lindau am Harz.

TEXT **ELKE MAIER**

Der Lärm war ohrenbetäubend: In der Abenddämmerung des 7. November 1969, um exakt 17.52 Uhr Ortszeit, hob von der Western Test Range im kalifornischen Vandenberg eine vierstufige *Scout-B*-Trägerrakete ab. Kurz darauf verkündete eine Lautsprecherstimme die lang ersehnte Botschaft: „We have lift-off!" Für die versammelten Wissenschaftler und Techniker, die den Start verfolgten, war es das Signal, um die Sektflaschen zu köpfen: *AZUR*, der erste deutsche Satellit, war nach fast fünfjähriger Bauzeit auf dem Weg ins All.

Etwa 45 Minuten nach dem Start meldete das deutsche Kontrollzentrum im bayerischen Oberpfaffenhofen den Empfang erster Daten und die ordnungsgemäße Funktion des Auslegers, auf dem das Magnetometer montiert war, sowie des Jo-Jo-Systems, das den Spin des Satelliten abbremste. *AZUR* hatte seine geplante Umlaufbahn ohne Zwischenfälle erreicht. Permanentmagneten richteten den Raumflugkörper am Erdmagnetfeld aus und stabilisierten ihn dadurch. 5300 Solarzellen auf der Außenwand sicherten seine Energieversorgung.

AZUR sollte die Erde in einem stark elliptischen, polaren Orbit in 383 bis 3145 Kilometer Abstand umkreisen und dabei die Daten von acht Messinstrumenten zur Erde senden. Seine Mission: die Untersuchung von Ladungsaustauschprozessen im inneren Van-Allen-Gürtel – einem Ring energiereicher, geladener Teilchen, die durch das Magnetfeld der Erde eingefangen werden. Außerdem wollten die Wissenschaftler mithilfe des Satelliten energiereiche Teilchen aus Sonneneruptionen messen und die Polarlicht-Erscheinungen erforschen.

Mit *AZUR* war Deutschland im selben Jahr, als der erste Mensch zum ersten Mal seinen Fuß auf den Mond setzte, der Sprung in den Weltraum gelungen – zwölf Jahre, nachdem der russische Satellit *Sputnik 1* das Raumfahrtzeitalter eingeläutet hatte. Neben der Sowjetunion verfügten 1969 nur sechs weitere Nationen über eigene Satelliten: die USA, Großbritannien, Italien, Frankreich, Kanada und Australien. In Deutschland hatten die Kontrollratsbeschlüsse nach dem Zweiten Weltkrieg ein eigenes Raumfahrtvorhaben verhindert.

Erst mit Erlangen der Souveränität der Bundesrepublik 1955 durften die Deutschen wieder Raumfahrtforschung betreiben, aber das nötige Know-how fehlte. Deutsche Firmen hatten praktisch keine Erfahrung im Bau von Raumfahrzeugen. Den Anstoß zum ersten eigenen Weltraumprojekt gab 1962 der Luftfahrtpionier und Unternehmer Ludwig Bölkow. Als treibende Kraft in der nationalen Luft- und Raumfahrt setzte er sich dafür ein, neue Technologien im eigenen Land zu entwickeln.



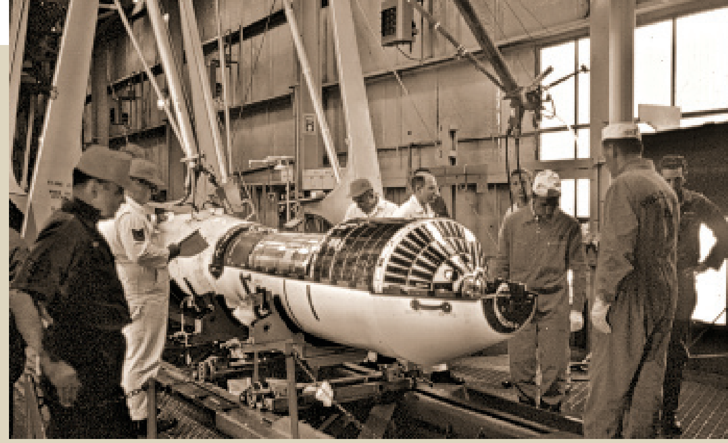
Er machte Deutschland zur Raumfahrtnation: der Forschungssatellit *AZUR*.

Wichtigster Kooperationspartner war die US-Raumfahrtbehörde NASA, die Hilfestellung im Projektmanagement und bei technischen Fragen gab. Nach dreijähriger Vorbereitungs- und Planungszeit sowie zahllosen Gesprächen unterzeichneten die NASA und das Bundesministerium für wissenschaftliche Forschung am 17. Juli 1965 ein *Memorandum of Understanding* mit dem Ziel, ein gemeinsames Satellitenprojekt in Angriff zu nehmen: 625A-1 – später *AZUR* genannt. Der Plan: Deutschland entwickelt einen Satelliten und dessen wissenschaftliche Nutzlast, Amerika stellt eine Trägerrakete bereit, um den Satelliten auf seine Umlaufbahn zu bringen, und verfolgt mit seinen Bodenstationen die Bahn des Flugkörpers.

Für Deutschland war *AZUR* nicht nur wegen der fehlenden technischen Erfahrung eine Herausforderung. Es gab weder eine Organisation, um das Projekt zu koordinieren, noch die notwendige Infrastruktur; Testanlagen und Bodenstationen fehlten. Um das Gesamtprojekt zu leiten, gründete man eigens die Gesellschaft für Weltraumforschung (GfW).

Erhard Keppler vom Max-Planck-Institut für Aeronomie in Lindau am Harz übernahm die wissenschaftliche Leitung von *AZUR*. Der damals 35-jährige Physiker gab 1966 auch den Anstoß zum Bau einer Bodenbetriebsstation auf dem Gelände des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, die es ermöglichen sollte, den Satelliten zu steuern, seine Bahn zu verfolgen und die Daten aus dem All zu empfangen. Damit initiierte er die Gründung

Foto: DLR-Archiv, Köln



Deutsch-amerikanische Zusammenarbeit:
Die Techniker montieren *AZUR* auf eine US-Trägerrakete.

des späteren renommierten Deutschen Raumfahrt-Kontrollzentrums in Oberpfaffenhofen südwestlich von München.

Keppler veranlasste auch den Aufbau von drei Bodenstationen in Sodankylä (Finnland), Reykjavik (Island) sowie in Fort Churchill (Kanada), um Röntgenstrahlungsausbrüche in der polaren Atmosphäre in Echtzeit untersuchen zu können. Mit dem Betrieb dieser Stationen sollte eine logistische Meisterleistung gelingen, denn in regelmäßigen Abständen musste das Kontrollzentrum in Oberpfaffenhofen neue Lochstreifen mit den Steuerbefehlen zur Nachführung der Antennen herstellen. Sie wurden von Piloten der Lufthansa in das jeweilige Land geflogen und über Mittelsmänner zu ihrem Bestimmungsort gebracht.

Um den Satelliten vor dem Start zu testen, baute die Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft (IABG) in Ottobrunn bei München geeignete Versuchsanlagen – Vibrationstische, Thermalvakuumkammern sowie eine hochmoderne Magnet-Testanlage. Dass die Gesamtkosten des Projekts den geplanten Rahmen sprengten, scheint nicht verwunderlich: *AZUR* kostete statt der veranschlagten 30 Millionen schließlich weit über 70 Millionen Mark.

Die wissenschaftlichen Experimente waren im Einvernehmen mit der NASA aus 100 eingesendeten Projektvorschlägen ausgewählt worden. An der Entwicklung und am Bau der Messinstrumente an Bord des 115 Zentimeter langen und rund 72 Kilogramm schweren Satelliten beteiligten sich fünf wissenschaftliche Institute: das Max-Planck-Institut für Aeronomie, das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching, das Institut für

Göttinger Tageblatt vom 5. November 1969

» Wenn man bedenkt, wieviel Zeit jedoch (...) allein die organisatorische Vorbereitung (...) gekostet hat, kann man einen Wunsch der Wissenschaftler verstehen: daß nach Azur (...) die Mühlen der deutschen „Weltraumbürokratie" nicht nur so genau, sondern auch so schnell mahlen, wie das Tempo der Weltraumforschung anderer Länder es schon seit einem Jahrzehnt vorschreibt.

Kernphysik in Kiel, das Institut für Geophysik und Meteorologie in Braunschweig sowie das DFVLR-Institut für Atmosphärenphysik in Oberpfaffenhofen.

Alle Instrumente mussten in doppelter Ausführung angefertigt werden, denn die NASA hatte zur Bedingung gemacht, dass die Geräte vor der eigentlichen Mission auf Raketenflügen ihre Praxistauglichkeit beweisen mussten. Dazu stellte sie vier Trägerraketen zur Verfügung, zwei vom Typ *Javelin* und zwei vom Typ *Nike Apache*, die 1966 und 1967 von Fort Churchill in Kanada, von Kiruna in Schweden und von Natal in Brasilien gestartet wurden. Die Tests verliefen erfolgreich – eine weitere Hürde war geschafft.

Im September 1967 konnte mit der Fertigung der Qualifikations-, Prototyp- und Flugmodelle von *AZUR* begonnen werden. Vom Beginn der Qualifikationsprüfungen bis zum Start wurden zahlreiche Störungen behoben. Anfang Oktober 1969 nahm das Bodenbetriebssystem termingerecht den Dauer-Simulationsbetrieb auf, um für die Flugphase gewappnet zu sein. Während der Startvorbereitungen auf der Range in Kalifornien gab es keine Zwischenfälle mehr.

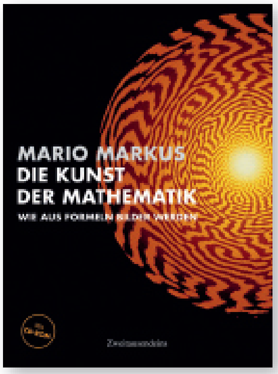
AZUR sendete die Messdaten, die er bei jeder rund zweistündigen Erdumrundung sammelte, in Echtzeit an die Bodenstationen. Gleichzeitig zeichnete ein Magnetband an Bord die Daten auf. Sobald der Satellit die Bodenstation in Oberpfaffenhofen überflog, rief das Kontrollzentrum das Band ab. Leider fiel schon vier Wochen nach dem Start das Bandaufzeichnungsgerät aus, trotzdem konnten die Forscher immerhin noch etwa 70 Prozent der Daten in Echtzeit empfangen, indem sie weitere Echtzeit-Bodenstationen einschalteten. Insgesamt sendete der Satellit 30 Milliarden Bit Informationen in Echtzeit sowie rund 250 Millionen Bit an Daten auf Band.

Am 29. Juni 1970, 233 Tage nach dem Start, brach der Funkkontakt plötzlich ab. Die Ursache wurde nie geklärt, aber vermutlich hatte die hohe Strahlenbelastung, der *AZUR* auf seiner Umlaufbahn ausgesetzt war, den Datensender geschädigt. Obwohl der Satellit seine geplante Lebensdauer von einem Jahr nicht erreichte, werteten Forschung, Politik und Industrie das Projekt als vollen Erfolg. Es lieferte wertvolle wissenschaftliche Erkenntnisse, die vor allem dazu beitrugen, die Physik des irdischen Strahlungsgürtels besser zu verstehen, und führte staatliche Institutionen, wissenschaftliche Institute und Firmen zusammen. Sechs deutsche Unternehmen lieferten die kompletten Funktionssysteme des Satelliten. Beim Systemführer, der Firma Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH, flossen alle Arbeiten zusammen.

Das Wissen und die Erfahrung, die die deutschen Forscher und Firmen gewonnen hatten, ebneten den Weg für die Beteiligung an künftigen Raumfahrtprojekten. Nicht zuletzt war *AZUR* der Beginn einer engen deutsch-amerikanischen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Weltraumforschung. Diese Kooperation machte unter anderem so erfolgreiche Projekte wie die beiden Sonnensonden *HELIOS* möglich, die 1974 und 1976 in Cape Kennedy in Florida ihre Reise ins All antraten, um den sonnennahen Raum zu erforschen.

AZUR aber kreiste, nachdem er den Kontakt zur Erde verloren hatte, weiterhin durchs All. Und tut es vielleicht noch heute. Während einige Quellen berichten, der Flugkörper sei rund zehn Jahre nach seinem Start beim Eintauchen in die Erdatmosphäre verglüht, geht aus anderen Angaben hervor, dass sich der Satellit noch immer im Weltraum befindet – zusammen mit Tausenden anderen, die ihm seither ins All gefolgt sind. ◂

Foto: Erhard Keppler



Grafische Wunderwelt

Mario Markus, **Die Kunst der Mathematik, Wie aus Formeln Bilder werden**

223 Seiten, Zweitausendeins-Verlag, Frankfurt am Main 2009, mit CD-ROM, 24,90 Euro

Mario Markus, heute emeritierter Biophysiker des Max-Planck-Instituts für molekulare Physiologie in Dortmund, legt mit diesem Buch eine Art Summe seiner langjährigen Arbeiten im Grenzgebiet zwischen Kunst und Wissenschaft vor. Seit 1985 beschäftigte er sich mit chaotischen Systemen in der Biologie. So entstanden zunächst als „Nebenprodukte" aus relativ einfachen Gleichungen durch Iterationen außerordentlich komplexe und zugleich ästhetisch ansprechende Grafiken, die den Hauptteil des Buchs ausmachen. Die ästhetische Vielfalt ist enorm: Neben zahlreichen Insekten, Aliens und Monstern meint man pflanzenähnliche Strukturen, kaleidoskopartige Muster oder Wolkenkratzer zu sehen, meist eingebettet in eine Art von galaktischen Räumen.

Eine der interessantesten Grafiken, die auch den Titel ziert, ist die Simulation einer Halluzination, die durch Sauerstoffmangel im Sehzentrum des Gehirns entsteht und die vermutlich eine gute Erklärung für das berühmte „Licht am Ende des Tunnels" sein dürfte, von dem seit Jahrhunderten als Teil von Nahtoderlebnissen berichtet wird. Für Mario Markus sind diese Arbeiten auch ein Beitrag dazu, die Grenzen zwischen den „Zwei Kulturen" – hier vor allem zwischen Wissenschaft und Kunst – einzureißen.

„Chaotisch" ist in der Physik übrigens ein festgelegter Begriff, der nicht wie im Alltagsgebrauch einfach ein Durcheinander meint, sondern die Eigenschaft eines Systems, dessen Verhalten nicht vorhersagbar ist, obwohl alles nach deterministischen Naturgesetzen abläuft. Das nicht langfristig vorhersagbare Wetter dürfte das bekannteste Beispiel sein. Erst in den vergangen 40 Jahren hat man erkannt, dass viele natürliche und auch soziale Systeme ein solches chaotisches Verhalten zeigen. In der Natur sind derartige Muster am besten für Jäger-Beute-Modelle oder für periodische chemische Reaktionen wie die berühmte Belousov-Zhabotinsky-Reaktion bekannt.

Der Autor hatte diese Grafiken in den 1990er-Jahren schon mehrfach auch international ausgestellt, als Titelbilder zierten sie unter anderem die Zeitschrift NATURE, SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, diverse Fachjournale und mehrere Bücher. In diesem Buch beschreibt Markus nun für alle Grafiken die zugrunde liegenden Gleichungen und erläutert die dahinterliegende Rechentechnik. In den Jahren 2008 und 2009 sind auch englische und spanische Ausgaben des Titels erschienen.

Das Buch ist wunderbar unterhaltend geschrieben und zeigt zugleich die Irrfahrten eines Biophysikers, der unversehens in Diskussionen über die Postmoderne gerät: 1990 erreichte Mario Markus die Anfrage des Düsseldorfer Philosophieprofessors Friedrich Rapp, ob er sich nicht an einer Vorlesungsreihe über postmoderne Wissenschaft beteiligen wolle. Seitdem war Markus eine Weile in Diskussionen über postmoderne Wissenschaft und Chaosforschung involviert, die etwa Bremer Wissenschaftler im Streit mit SPIEGEL-Redakteuren bis vor den Kadi geführt haben.

Im Jahr 1993 erreichte dieser Medienhype wohl seinen Höhepunkt mit einer SPIEGEL-Titelstory „Kult um das Chaos – Aberglaube oder Welterklärung" und drei Folgeartikeln, in denen mehrere Professoren verschiedener Universitäten diskreditiert wurden. Heute hat sich die intellektuelle Atmosphäre wieder entspannt, weder Postmoderne noch Chaosforschung scheinen noch recht en vogue zu sein.

Ob modern oder postmodern: Den Streit um diese Begriffe braucht es nicht, um Markus' Buch und seine Arbeiten hochinteressant zu finden. Mit mathematischen Anhängen, zahlreichen Fußnoten und hervorragend anzuschauen und zu lesen, ist es ein Reiseführer in das Grenzgebiet zwischen Ästhetik und Mathematik, der weder zu oberflächlich noch zu detailliert ist. Kurz: eine grafische Wunderwelt.

Gottfried Plehn



Blättern im Familienalbum

Forschung macht Schule, Bevölkerungsentwicklung in Deutschland

DVD-Video, 24 min, 2009, FWU-Bestellnummer: 4602625, Unterrichtslizenz: 90,00 Euro

Bevölkerungsentwicklung in Deutschland – der Titel dieser in Zusammenarbeit mit dem Max-Planck-Institut für demografische Forschung in Rostock sowie dem Institut für Film und Bild in Wissenschaft und Unterricht (FWU) entstandenen und Ende 2009 herausgegeben DVD für den Schulunterricht klingt zugegebenermaßen recht trocken. Doch dahinter verbergen sich Veränderungen, die maßgebliche Auswirkungen auf Familie, Gesellschaft und Staat haben werden.

In Deutschland werden seit Jahrzehnten immer weniger Kinder geboren, die Bevölkerung ist – wie in den meisten Industrienationen – rückläufig und wird nur durch Zuwanderung stabil gehalten. Darüber hinaus kehrt sich die Alterspyramide um – mit verheerenden Folgen für den Arbeitsmarkt und die sozialen Sicherungssysteme. Der demografische Wandel hat uns voll im Griff. Das Thema ist gesellschaftspolitisch relevant, wenn nicht gar brisant, und gehört als solches unbedingt in den Schulunterricht. Allerdings sind sinkende Geburtenraten, steigende Lebenserwartung sowie Zu- und Abwanderung aus verschiedenen Teilen des Landes zunächst nur schnödes Zahlenwerk, das sich vielleicht noch in bunte Grafiken fassen lässt. Nicht viel für einen Film.

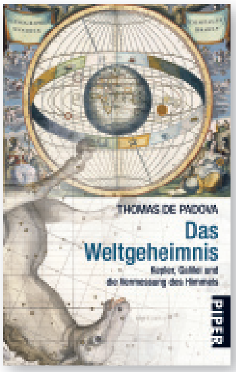
Andererseits kann jeder den demografischen Wandel in der eigenen Familie nachvollziehen: Tatsächlich wird Oma schon 80 und wirkt immer noch ganz fit. Fünf Geschwister zeigt das Schwarz-Weiß-Foto aus ihren Kindertagen. Unsereins kann sich gerade mal über einen Bruder oder eine Schwester freuen. Und dass Oma eigentlich aus einer ganz anderen Gegend Deutschlands kommt, hatten wir auch schon beinahe vergessen.

Die Möglichkeit, den demografischen Wandel an der eigenen Familienbiografie festzumachen, hat Drehbuch-Autor und Regisseur Herbert Hackl – gerade auf dem europäischen Medien-Festival für seinen Film *Energie der Zukunft. Fusion 2100* mit dem MIDAS-Preis 2009 ausgezeichnet – genutzt und dem Schulstoff eine Rahmenhandlung verpasst: Im Gespräch mit seiner Großmutter werden Niko die Folgen einer steigenden Lebenserwartung bei gleichzeitig sinkender Geburtenrate klar.

Geschickt wechselt der Regisseur zwischen der Rahmenhandlung und den Interviewsequenzen mit Wissenschaftlern am Max-Planck-Institut für demografische Forschung. Sie erläutern, wie sich die durchschnittliche Geburtenrate anhand des Mikrozensus ermitteln lässt und welche Entwicklungen sich in den verschiedenen europäischen Ländern feststellen lassen. Sie sammeln Sterbedaten aus alten Kirchenbüchern, um den Anstieg der Lebenserwartung in den vergangenen hundert Jahren nachzuzeichnen. Und sie spüren den Ursachen von Zu- und Abwanderung nach, indem sie wachsende Regionen aufsuchen ebenso wie Industriebrachen.

Der 24-minütige Hauptfilm ist auf der DVD noch einmal in thematisch voneinander abgegrenzten Sequenzen abgelegt – Merkmal einer jeden didaktischen DVD vom FWU – und erlaubt somit die gezielte Aufbereitung der einzelnen Themen von Fertilität über Mortalität bis hin zu Migration. Die DVD enthält darüber hinaus weitere Grafiken und Arbeitsblätter.

Christina Beck



Geniale Briefpartner

Thomas de Padova, **Das Weltgeheimnis, Kepler, Galilei und die Vermessung des Himmels**

352 Seiten, Piper Verlag, München 2009, 19,95 Euro

Briefwechsel sind eine faszinierende Quelle der subjektiven Wahrnehmung von Wirklichkeit, aber auch von Denkmodellen, Theorien und letztlich der Lebensepoche ihrer Schreiber. Ob Musik- oder Literaturwissenschaft, ob Geschichte oder Kunstgeschichte – alle diese Disziplinen profitieren vom Studium privater Schriften großer Geister. Auch die Naturwissenschaften haben längst ihren Wert erkannt, und so gelten die Briefe eines Alexander von Humboldt, eines Albert Einstein oder zwischen Isaac Newton und Gottfried Wilhelm Leibniz längst als Klassiker der Wissenschaftsgeschichte.

Thomas de Padova studierte Physik und Astronomie, war Redakteur beim Berliner Tagesspiegel und arbeitet heute als freier Autor. Zum vorliegenden Buch mit dem inspirierenden Titel *Das Weltgeheimnis* ließ er sich vom eben zu Ende gegangenen „Internationalen Jahr der Astronomie“ anregen und von dessen Protagonisten: Galileo Galilei und Johannes Kepler. Beide hatten sie 1609 etwas geschafft, was man heute in den Medien mit dem überstrapazierten Begriff „Durchbruch“ beschreiben würde.

Galilei richtete als erster Forscher ein von ihm gebautes Fernrohr zum Himmel und entdeckte Berge und Krater auf dem Mond, vier Satelliten des Jupiter, die Phasen der Venus oder die unzähligen Sterne der Milchstraße. Kepler veröffentlichte sein Werk *Astronomia Nova*, worin er zwei Gesetze beschreibt, die das Fundament für die Bewegungen der Körper im Planetensystem bilden.

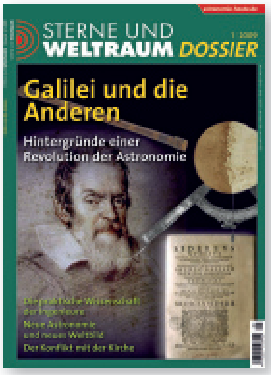
Auf diese Weise stellen die beiden Wissenschaftler das von Nikolaus Kopernikus erstmals in der Neuzeit formulierte heliozentrische System auf eine solide Basis. Unser Planet ist eben nicht der Mittelpunkt des Weltalls, sondern im Zentrum thront die Sonne. Sie wird von der um ihre Längsachse rotierenden Erde ebenso umlaufen wie von den anderen großen Planeten. Doch das kosmische Uhrwerk ging falsch, die in der Antike ersonnenen ineinander geschachtelten Sphären, mit denen die Naturforscher und Philosophen das geozentrische Modell retten wollten, erwiesen sich als äußerst ungenau.

Der Italiener Galilei, ruhmsüchtiger Praktiker und Pragmatiker mit Geschäftssinn, der Schwabe Kepler, bescheidener Theoretiker und Mystiker, der um seinen Lebensunterhalt kämpft: Beiden gemein ist ihre Genialität und der feste Glaube an ein heliozentrisches Weltbild. Aber wurde über sie nicht schon alles gesagt und geschrieben? Das Buch von Thomas de Padova beweist das Gegenteil! Denn der Autor wählt einen neuen Ansatz, indem er den bisher wenig beachteten Briefwechsel zwischen den beiden Naturforschern zum roten Faden eines sehr empfehlenswerten Sachbuchs macht.

Diese Korrespondenz dient als Mittel zum Zweck. De Padova entwickelt daraus einerseits präzise Charakterbilder und Biografien seiner so unterschiedlichen Protagonisten, zum anderen spiegelt er vor dem politischen Hintergrund die wissenschaftliche Entwicklung im Zeitalter der Spätrenaissance. Und er zeigt, dass Galilei und Kepler zwar große Revolutionäre sind, aber doch immer wieder traditionellen Denkmustern folgen.

Das Buch ist in drei Teile gegliedert: „Der Blick durchs Fernrohr“, „Der Italiener und der Deutsche“ sowie „Zwischen Himmel und Hölle“. Darin erfährt der Leser interessante Details über Galileis Prozess vor der Inquisition ebenso wie über Keplers Hang zur Astrologie, die für ihn im wörtlichen Sinne tägliches Brot ist. Zeittafel, Personenregister und ein ausführliches Literaturverzeichnis runden die Darstellung ab. So gerät *Das Weltgeheimnis* zu einem lesenswerten und erhellenden Abriss einer der wichtigsten Umwälzungen in der Wissenschaft. Helmut Hornung

Neu erschienen



Viele Revoluzzer

Galilei und die Anderen, Hintergründe einer Revolution der Astronomie

106 Seiten, SuW-Dossier 1/2009, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg 2009, 8,90 Euro

Die Revolution der Astronomie – so der Untertitel des vorliegenden Sonderhefts der Zeitschrift STERNE UND WELTRAUM – ist meist mit drei Namen verknüpft: Nikolaus Kopernikus, Galileo Galilei und Johannes Kepler. Tatsächlich lässt sich dieser historische Umbruch, der das Weltverständnis der Menschheit nachhaltig geprägt hat, nicht nur an einzelnen herausragenden Forschern festmachen. Neuere Studien ergeben ein komplexes Geflecht, an dem viele Zeitgenossen als Techniker, Künstler oder Politiker über einen langen Zeitraum mitgewoben haben. Oder, wie es im Vorwort des Hefts heißt, „in dem viele Riesen und Zwerge eine Rolle spielen".

Dieses komplexe Bild erhellen neun Wissenschaftshistoriker am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte und an befreundeten Instituten. Ihre Forschungen analysieren jahrhundertelange Entwicklungen und beziehen etwa auch die Religion mit ein. So stehen eben nicht nur der Fall Galilei oder die Ursprünge des Teleskops im Mittelpunkt. Der Leser erfährt auch etwas über die Entwicklung der Beobachtungskunst von Claudius Ptolemäus bis Tycho Brahe oder über die Erforschung der Sonne und ihre Verbindung zur darstellenden Kunst. Auf diese Weise werden die Hintergründe der astronomischen Revolution beleuchtet.

Besonders interessant, weil sonst in der Literatur eher vernachlässigt, sind Themen wie „Galileis astronomische Werkstatt", worin man erfährt, dass der italienische Gelehrte schon vor seiner brillanten Verbesserung des Fernrohrs als vorzüglicher Handwerker galt. Auch den Abschnitt über die Entstehung neuer Weltbilder oder „Die neue Sicht des Himmels" liest man mit großem Gewinn; in letzterem Kapitel folgt der Autor der These, dass die durch Galilei repräsentierte neue Astronomie der Ausdruck einer allgemeinen Emanzipation der Wissenschaft war.

Die vielen – großteils historischen – Abbildungen machen das Heft auch optisch zu einem Genuss. Die Lektüre ist für jeden ein Muss, der sich schnell und fundiert in die große Revolution der Astronomie einarbeiten und gleichzeitig auf beste Weise und hohem intellektuellen Niveau unterhalten werden möchte. Helmut Hornung

Weitere Empfehlungen

- Manjit Kumar, **Quanten**, Einstein, Bohr und die große Debatte über das Wesen der Wirklichkeit, 540 Seiten, Berlin Verlag, Berlin 2009, 28,00 Euro
- Julia Reuter, Günther Vedder, und Brigitte Liebig (Hg.), **Professor mit Kind**, Erfahrungsberichte von Wissenschaftlern, 255 Seiten, Campus Verlag, Frankfurt am Main 2008, 24,90 Euro
- Claus Kiefer, **Der Quantenkosmos**, Von der zeitlosen Welt zum expandierenden Universum, 352 Seiten, S. Fischer Verlag, Frankfurt am Main 2008, 22,90 Euro
- Bruno P. Kremer, **Kremers Strandkorb Sammelsurium**, Natur-Wissen für die schönsten Tage des Jahres, 288 Seiten, S. Hirzel Verlag, Stuttgart 2009, 29,90 Euro

Standorte

- Institut / Forschungsstelle
- Teilinstitut / Außenstelle
- Sonstige Forschungseinrichtungen

Niederlande
- Nimwegen

Italien
- Rom
- Florenz

USA
- Florida

BRASILIEN
- Manaus



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Impressum

MaxPlanckForschung wird herausgegeben vom Referat für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V., vereinsrechtlicher Sitz: Berlin.
ISSN 1616-4172

Redaktionsanschrift
Hofgartenstraße 8, 80539 München
Tel.: 089 2108-1562, Fax: 089 2108-1405
E-Mail: mpf@gv.mpg.de
Internet: www.magazin-dt.mpg.de

Verantwortlich für den Inhalt
Dr. Christina Beck (-1276)

Redaktionsleitung
Peter Hergersberg (-1536), Helmut Hornung (-1404)

Redaktion
Dr. Christina Beck (Biologie, Medizin; -1276)
Birgit Fenzel (Kultur & Gesellschaft; -1471)
Peter Hergersberg (Chemie, Physik, Technik; -1536)
Helmut Hornung (Astronomie; -1404)

Assistenz/Bildredaktion
Susanne Schauer (-1562)

Wissenschaftlicher Beirat
Prof. Dr. Gerhard Wegner
Prof. Dr. Heinz Wässle
Prof. Dr. Wolfgang Prinz

Gestaltung
Julia Kessler, Sandra Ostertag
Voßstraße 9, 81543 München
Tel.: 089 27818770
E-Mail: projekte@designergold.de

Litho
kaltnermedia GmbH
Dr.-Robert-Zoller-Str. 1, 86399 Bobingen

Druck & Vertrieb
Vogel Druck- & Medienservice GmbH
Leibnizstr. 5, 97204 Höchberg

Anzeigen
Beatrice Rieck
Vogel Druck- & Medienservice GmbH
Leibnizstr. 5, 97204 Höchberg
Tel.: 0931 4600-2721, Fax: 0931 4600-2145
E-Mail: beatrice_rieck@vogel-druck.de

MaxPlanckForschung berichtet über aktuelle Forschungsarbeiten an den **Max-Planck-Instituten** und richtet sich an ein breites, wissenschaftsinteressiertes Publikum. Die Redaktion bemüht sich, auch komplexe wissenschaftliche Inhalte möglichst allgemeinverständlich aufzubereiten. Das Heft erscheint in deutscher und englischer Sprache (**MaxPlanckResearch**) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr; die Auflage dieser Ausgabe beträgt 65000 Exemplare (**MaxPlanckResearch**: 10000 Exemplare). Der Bezug ist kostenlos. Ein Nachdruck der Texte ist nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet; Bildrechte können nach Rücksprache erteilt werden. Die in **MaxPlanckForschung** vertretenen Auffassungen und Meinungen können nicht als offizielle Stellungnahme der **Max-Planck-Gesellschaft** und ihrer Organe interpretiert werden.

Die **Max-Planck-Gesellschaft** zur Förderung der Wissenschaften unterhält 80 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 20400 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 4900 fest angestellte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2009 umfasst insgesamt 1,3 Milliarden Euro. Die **Max-Planck-Institute** betreiben Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften. Die **Max-Planck-Gesellschaft** ist eine gemeinnützige Organisation des privaten Rechts in der Form eines eingetragenen Vereins. Ihr zentrales Entscheidungsgremium ist der Senat, in dem Politik, Wissenschaft und sachverständige Öffentlichkeit vertreten sind.